

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh a realizace vysílací části pro mobilní FSO síť.

Design and Realization of Optical Transmitter for Mobile FSO Network.

2014

Filip Hučko

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Filip Hučko

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a realizace vysílací části pro mobilní FSO síť.
Design and Realization of Optical Transmitter for Mobile FSO Network.

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte přehled vhodných zapojení pro řízení výkonových LED diod s ohledem na možnost současného osvětlení a komunikace.
2. Seznamte se s principem detekce optických signálů.
3. Vyberte vhodná zapojení modulátorů použitelná pro mobilní FSO síť.
4. Vybraná zapojení realizujte, ověřte a zhodnoťte jejich použitelnost.

Seznam doporučené odborné literatury:

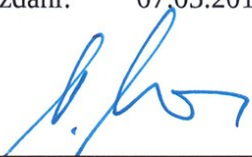
PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Hejduk**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.



V Ostravě dne: 7. mája 2014

.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval Ing Stanislavovi Hejdukovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom a realizáciou mobilnej vysielacej časti bezdrôtového optického spoja (FSO). V bakalárskej práci je uvedený teoretický popis bezdrôtových optických systémov. Práca sa ďalej zaoberá problematikou návrhu mobilnej vysielacej časti FSO. Obsahuje prehľad vhodných zapojení výkonových LED diód a prehľad zapojení modulátorov použiteľných pre mobilné FSO siete. V praktickej časti sa nachádza experimentálne overovanie realizovaného zapojenia mobilného modulátora. Koncom popisuje praktické využitie realizovaného optického bezdrôtového vysielача v inteligentnom komunikačnom systéme V2I.

Klíčová slova

Mobilné optické bezdrôtové spoje; FSO ; optický vysielач; modulátor; návrh; riadenie výkonových LED; viditeľné spektrum svetla; V2V; V2I; VLC.

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of mobile broadcast part of the wireless optical link (FSO). In this work is presented a theoretical description of optical wireless systems. The work also deals with the issue of transmitting part of the FSO. Provides an overview of the involvement of appropriate power LEDs and an overview of the involvement of modulators applicable for mobile FSO networks. The practical part is the experimental verification of the involvement of cell modulator. At the end describes the practical use of realized optical wireless transmitter implemented in smart V2I communication system.

Key words

Mobile free space optics; FSO; optical transmitter; modulator; design; power LED; spectrum of light; V2V; V2I; VLC.

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
°	Stupne	Uhol
I	A	Prúd
K	Kelvin	Teplota
Lm	Lumen	Svetelný tok
Lux	lx	Intenzita osvetlenia
U	V	Napätie
W	Watt	Výkon

Zoznam použitých skratiek

Zkratka	Anglický význam	Slovenský Význam
APD	Avalanche photodiode	Lavínová fotodióda
BER	Bit error rate	Chybovosť
dB	Decibel	Decibel
FSO	Free Space Optics	Bezdrôtové optické siete
IR	Infrared	Infračervený
LED	Light-emitting diode	Dióda emitujúca svetlo
LD	Laser diode	Laserova diode
LOS	Line of Sight	Priama viditeľnosť
PIN	PIN Photodiode	PIN Fotodióda
RF	Radiofrequency	Rádiofrekvenčný
SNR	Signal to noise ratio	Pomer šumu
UAV	Unmanned aerial vehicle	Bezpilotné lietadlo
USD	United States dollar	Americký dolár
V2I	Vehicle to Infrastrucutre	Vozidlo - Infraštruktúra
V2V	Vehicle to Vehicle	Vozidlo – Vozidlo
VLC	Visible Light communication spektre	Komunikácia vo viditeľnom

Obsah

1	Úvod.....	1
2	FSO (Free - Space Optic).....	2
2.1	Princíp FSO	2
2.2	Výhody FSO.....	3
2.3	Nevýhody FSO.....	3
2.4	História.....	4
2.5	Popis prenosového systému Bod-Bod.....	5
2.6	Popis prenosového systému mobilnej FSO.....	6
3	Optoelektronické prvky.....	9
3.1	LED diódy.....	9
3.2	Laserova Dióda.....	11
3.3	Porovnanie LED a LD diód.....	12
4	Detektory optického žiarenia.....	13
4.1	PN fotodióda.	13
4.2	PIN fotodióda.....	14
4.3	Lavinová APD dióda.....	14
5.	Prenosové médium.....	15
5.1	Útlm signálu.....	15
5.2	Free space Loss.....	16
6.	Požiadavky na Modulátor.....	17
6.1	Modulácia a kódovanie.	17
6.2	Spotreba energie.....	18
6.2.1	Prehľad vhodných zapojení modulátorov použiteľných pre mobilné FSO siete.....	18
6.3	Stabilita.....	21

7. Návrh a testovanie modulátora pre mobilné FSO siete.....	22
7.1.1 Pridanie kompenzačného kondenzátora.....	22
7.2. Realizácia plošného spoja modulátoru pre mobilné FSO siete.....	24
7.3 Použitá výkonová LED dióda.....	25
7.2.1 Meranie smerovej vyžarovacej charakteristiky výkonovej LED diódy.....	26
7.4. Meranie Frekvenčnej charakteristiky realizovaného zapojenia modulátoru.....	27
7.5 Meranie pri použití Diferenciálneho Manchesteru.....	28
8 Praktické overenie funkcie.....	32
8.1 Komunikácia V2I.....	32
8.2 Parametry pouličného osvetlenia.....	33
8.3 Meranie prijatých paketov na automobilovom vozidle.....	35
Záver.....	38
Použitá literatúra.....	39
Zoznam príloh.....	I

1 Úvod

V posledných rokoch sme mohli zaznamenať zvyšovanie dopytu po vyšších prenosových rýchlostiach a širšiu šírku pásma. Tento trend rozvoja bude pokračovať aj v ďalších desaťročiach a stane sa výzvou pre siete budúcej generácie. V konečnom dôsledku bude koncový užívateľ vyžadovať stále vyššie prenosové rýchlosti a plne prístupnú šírku pásma z chrbticovej infraštruktúry doručenej priamo do budovy. Optická bezdrôtová komunikácia ponúka alternatívu k rádio-frekvenčnej komunikácii aj v prípadoch, kde sú požadované vysoko výkonové linky. FSO systémy používajú technológiu vyžarovania viditeľného a infračerveného elektromagnetického spektra svetla.

Bakalárska práca sa zaoberá vysielacou časťou mobilnej bezdrôtovej optickej siete. Práca je rozdelená do viacerých kapitol. V teoretickej časti sa bližšie rozoberá bezdrôtový optický spoj. Pre bližšie oboznámenie s bezdrôtovým optickými sieťami sme stručne opísali jeho princíp, vlastnosti, výhody, nevýhody FSO a históriu. Ďalej sme bližšie popísali prenosový systém Bod - Bod a prenosový systém Bod - Viac bodov. V ďalších kapitolách sme sa zamerali na porovnanie vhodných zdrojov vyžarovania optického signálu, zoznámenie sa s prijímačmi optického signálu, prenosovým médiom a príčinami útlmu signálu. V závere teoretickej časti popisujeme spôsob modulácie vysielacieho elektrického signálu a požiadavky, ktoré sú kladené na modulátor vysielacej časti mobilnej FSO.

V praktickej časti bakalárska práca ponúka prehľad vhodných zapojení výkonových LED diód pre FSO siete, ich následné realizované praktické zapojenie a meranie vyžarovacej charakteristiky použitej výkonovej LED diódy.

V ďalších kapitolách bakalárska práca popisuje návrh a realizáciu mobilnej vysielacej časti modulátora pre FSO siete, ako aj jeho frekvenčnú charakteristiku a meranie intenzity osvetlenia pri jednotlivých logických úrovniach, ktoré sme počas merania menili.

Počas merania prebiehajúcej komunikácie sme zachytili na osciloskope odoslaný rámec z vysielача a určili sme jeho jednotlivé oktety. Pre funkčné overenie využiteľnosti realizovaného zapojenia sme sa rozhodli pre jeho experimentálne testovanie vo vonkajších priestoroch na automobilovom vozidle. Prvým krokom bolo meranie intenzity pouličného osvetlenia na verejných komunikáciách. Toto meranie malo informatívny charakter, a poznatky z neho sme mohli aplikovať pre zhodnotenie využiteľnosti realizovaného vysielача mobilnej FSO. Pre uvedenie a využitie tohto zapojenia v praxi sme sa rozhodli odmerať počet prijatých paketov komunikácie počas jazdy na automobilovom vozidle. Posledným krokom bakalárskej práce bolo zhodnotiť využitie realizovaného zapojenia pre inteligentné systémy v doprave V2I.

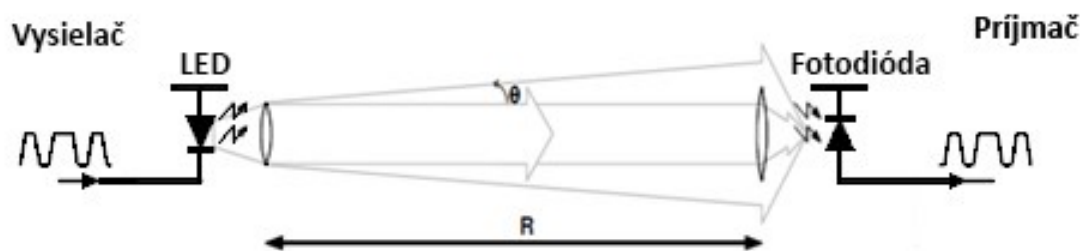
2. FSO (Free - Space Optic)

Free-Space Optic je optická technológia používajúca zväzok optického lúča pre prenos informácií prostredníctvom voľného priestoru. Ponúka vysoko rýchlostné, širokopásmové pripojenie a je cenovo nenáročná. Jej montáž aj demontáž je otázkou niekoľkých hodín. Bezdrôtová optická komunikácia je pomerne novou technológiou. FSO komunikačný systém pozostáva z optického vysielača, ktorým je laserová alebo LED dióda, modulátoru a teleskopu. Prijímač sa skladá z detektora, dekodéra a teleskopu pre zachytenie optického signálu. Optický signál sa šíri prostredníctvom voľného priestoru ktorý sa javí ako linkový kanál. Nárast záujmu o FSO systémy vychádza z dvoch hlavných dôvodov. Prvým je, že FSO systémy sa javia ako atraktívna alternatíva pre už existujúce mikrovlnové a rádio-frekvenčné komunikačné linky. Druhým dôvodom je širokopásmové bezdrôtové riešenie pre pripojenie na tzv. „Poslednom kilometri“ v metropolitných sieťach linkových konfigurácií point-to-point a point-to-multipoint.

Vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch sú ako zdroj optického signálu používané laserové a LED diódy. Fotodiódy sú použité ako prijímač optického signálu. Tieto opto-elektronické zariadenia sú v porovnaní s rádio frekvenčnými zariadeniami ako aj s pevnými káblovými systémami lacnejšie. Infračervený signál nedokáže preniknúť cez steny, čo z neho robí bezpečnejším najmä v kancelárskych priestoroch. S ohľadom na súkromie poskytujú FSO systémy vybudovanie bunkových sietí. Bunkové siete si môžeme predstaviť pod štruktúrou kancelárskej budovy, kde každá miestnosť predstavuje bunku tejto v sieti. V každej miestnosti je umiestnený vysielač, ktorý je určený pre komunikáciu v konkrétnej miestnosti. V takomto systéme nedochádza k interferenciám medzi jednotlivými bunkami. Nakoľko rádio-frekvenčné systémy potrebujú mať pre svoju správnu funkciu jednotlivé bunky frekvenčne oddelené, môžeme povedať, že optické bezdrôtové systémy sa stávajú populárnejšími v rôznych prostrediach ako sú domy, kancelárie, nemocnice. Cieľom FSO linky je teda vytvorenie novej formy bezdrôtovej optickej komunikácie, ktorá bude malých rozmerov a zároveň jej náklady budú nízke. Prvé praktické využitie bezdrôtovej optickej telegrafickej komunikácie bolo určené pre vojenské účely. Dokonca Nemecké koloniálne jednotky používali Heliograph - telegrafický vysielač už v roku 1904 počas Herero-genocídy na území Afriky. Hlavnou výhodou tejto technológie bola jej neschopnosť prerušiť spojenie snahou nepriateľa. V 20. storočí sa však väčšiemu rozvoju tešila rádio-frekvenčná komunikácia. Ďalší rozvoj optických komunikácií vo voľnom priestore umožnil až vývoj v oboroch polovodičovej optoelektroniky, vláknovej optiky a laserovej techniky. [1]

2.1 Princíp FSO

Linka pozostáva z vysielačej a prijímačej časti. FSO systémy sú navonok podobné bezdrôtovým rádiovým technológiám. Avšak pri dôkladnejšom preskúmaní FSO systému zistíme, že sú skôr príbuznejšie optickým vláknovým systémom. Od vláknových optických sietí sa líšia predovšetkým prenosovým médiom. Tým je pri technológií FSO voľný priestor, v ktorom sa šíri vysielačný svetelný lúč. Podstatným rozdielom medzi RF a FSO technológiou je, že FSO systémy používajú na prenos informácie optické lúče, kým RF systémy používajú na prenos rádiové vlny.



Obrázok 2.1: Schéma bezdrôtového optického spoja [2]

Vysielač Tx má za úlohu konvertovať elektrický signál na signál optický. Vhodnými zariadeniami pre emitovanie svetla sú LED dióda a LD laserová dióda. Tento signál sa šíri voľným priestorom, smerom ku prijímacej časti. Prijímacia a vysielačia časť musia mať pre svoju správnu činnosť navzájom priamu viditeľnosť. Prijímač alebo detektor zachytí optický signál pomocou foto diódy, ktorá detekuje fotóny na fotocitlivej vrstve a konvertuje ho na výstupné elektrické napätie.

Optické bezdrôtové siete majú určité výhody oproti rádio-frekvenčnej komunikácii.

2.2 Výhody FSO

- Nízka latencia
- Prenosové rýchlosti - pohybujú sa v rozmedzí $1 \text{ Mbp} \cdot \text{s}^{-1}$ – $2,5 \text{ Gbp} \cdot \text{s}^{-1}$
- Vysoká bezpečnosť dát pred odposluchmi
- Nelicencované spoje
- Prevoz nezávislý na počte voľných rádiových pásiem
- Minimálna spotreba energie
- Pomerne jednoduchá montáž aj demontáž
- Vhodné pre používanie v bezpečných v strážených oblastiach (nemocnice, lietadlá, armáda)

2.3 Nevýhody FSO

- Linková narušiteľnosť spôsobená objektmi, ktoré sú v oblasti trajektórie optického paprsku
- Nutná priama viditeľnosť
- Nevhodné na použitie pri väčších vzdialenostiach
- Optický šum spôsobený okolitými zdrojmi svetla (slnečné žiarenie, osvetlenie)
- Závislosť na atmosférických javoch (hmla, dážď, sneh, dym)

2.4 História

Od 70-tych rokov minulého storočia bol prevedený významný výskum v oblasti optických bezdrôtových sietí určených pre vysokorýchlostnú komunikáciu. V dnešnej dobe je táto oblasť ešte naďalej podrobovaná neustálemu výskumu pre vývoj výkonnejších a efektívnejších systémov pre komunikáciu. Jedným z dôvodov, prečo sa FSO systémy nevyvíjali intenzívnejšie počas predošlých desaťročí, bola už existujúca rozsiahla infraštruktúra RF sietí, ktorá bránila v rozvoji nových technológií. Zástancovia RF komunikácie tvrdili, že táto technológia pracuje v poriadku a že nie je potrebná jej náhrada. Táto skutočnosť je dôvodom, prečo v posledných 30-tych rokoch bola FSO komunikačná technológia skôr vo forme ideí a myšlienok. Takisto, za posledných pár rokov sa tento výskum sústreďoval na pochopenie a implementáciu optickej bezdrôtovej techniky určenej na väčšie vzdialenosti a pre použitie vo vonkajšom prostredí. Aj napriek tomu sú vnútorné zapojenia tými, ktoré sa považujú za hnaciu silu pod pojmom optických bezdrôtových systémov.

Prvý FSO systém bol vyvinutý v roku 1979. Tento systém využíval pre prenos infračervené lúče, ktoré sa širili všetkými smermi. Takéto systémy sa nazývajú difúzne infračervené systémy. Od tejto doby sa viacero produktov používajúce IR lúče úspešne dostalo do popredia a úspešne sa komerciovalizovali. FSO systémy doposiaľ našli svoje uplatnenie či už ako rôzne domáce jednoduché diaľkové ovládače rôznych zariadení alebo ako zložitejšie lokálne siete. Čo je však podstatnejšie, je to, že využitie FSO systémov sa plánuje aj v iných oblastiach, ktoré zahŕňujú dátové siete pre vnútorné prostredie budov a broadbandové služby pre mobilných užívateľov v týchto vnútorných priestoroch. Doposiaľ niekoľko firiem predstavilo svoje produkty využívajúce optické bezdrôtové siete, ktoré prenášajú takýmto spôsobom dáta. Na market vstupuje už taktiež mnoho iných produktov, ktoré komunikujú s osobným počítačom. Bezdrôtové siete ponúkajú užívateľom zvyšujúcu sa mobilitu a flexibilitu, ktorá umožňuje prístup k výmene informácií kdekoľvek bez potreby pre fyzické prepojenie siete. V porovnaní s rádio - frekvenčnými sieťami, optické siete, ktoré považujeme za bezdrôtovú komunikáciu, nespádajú pod FCC reguláciu. FCC regulácia platí pre rádio - frekvenčné siete vo frekvenčnom rozmedzí od 10 kHz až 300GHz. Taktiež tu nedochádza k žiadnym interferenciám s elektromagnetickým spektrom. Signál optického žiarenia je obmedzený k miestnosti, v ktorej je vytvorený. V takomto prípade nedochádza k žiadnej interferencii s podobným systémom, ktorý pracuje vo vedľajšej miestnosti. Neregulovateľné optické spektrum dovoľuje výrobcovi dizajnovat' ozaistný globálny produkt, bez starostí z hrozby o reguláciu, ktorá je v jednotlivých krajinách rozdielna.

Infračervené spektrum svetla má podobné vlastnosti správania sa ako svetlo vo viditeľnom spektre. Je absorbované tmavými objektmi, rozptyľované odrážané svetlými objektmi a priamo odrážané svetlými povrchmi. Dokáže preniknúť sklom, ale nie cez steny. Výsledkom je, že prenos infračerveným svetlom je možný iba v miestnosti, v ktorej vznikol, čo ho robí podstatne bezpečnejším pri ochrane proti bežnému odpočúvaniu. Táto skutočnosť tiež znamená, že rovnaká optická linka môže byť opäť použitá vo vedľajšej izbe bez rušenia signálu. [4]

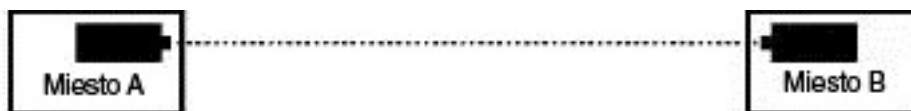
Vnútorné FSO siete majú v budúcnosti potenciál nahradiť štandard IEEE 802.11. Užívateľ dátových sietí má dve hlavné požiadavky, ktorými sú - vysoká dátová priepustnosť a mobilita. Vnútorné siete so štandardom IEEE 802.11, známe ako Wi-Fi spĺňajú tieto podmienky. V každom prípade sa tento štandard dostáva blízko k svojim prenosovým a kapacitným maximám a je potrebné vyvinúť iné technológie, ktoré by boli schopné ho nahradiť. Riešením by mohla byť sieť využívajúca optické lúče. Vnútorné FSO siete pracujú vo vnútri budov alebo uzavretých priestorov. Ich výhodou v porovnaní s vonkajšími sieťami je, že

nie sú v takej miere ovplyvňované atmosférickými efektmi. Rozsah pokrytia vnútorných FSO sietí sa vzťahuje iba na konkrétnu miestnosť. Ďalšiou výhodou je ich nízka cena komponentov pre optickú komunikáciu, malá veľkosť a nízka spotreba energie, ktoré sú tiež dôležitými parametrami.

2.5 Popis prenosového systému Bod-Bod

V klasickom prenosovom systéme Bod-Bod, sú vysielateľ a prijímač umiestnené na oboch stranách prenosovej cesty. Táto linka má schopnosť bezdrôtovo spojiť dve zariadenia pri vysokých rýchlostiach. Systémy bod-bod sú jednoduché, cenovo efektívne a prispôsobivé, pre montáž a demontáž jednoduché. Hlavnou požiadavkou pre fungujúci FSO systém je zabezpečenie priamej viditeľnosti medzi vysielateľom a prijímačom. Všeobecne platí, že bezdrôtová optická komunikácia je možná len za takých podmienok, kedy obe zariadenia - vysielateľ aj prijímač, môžu navzájom udržať priamu líniu viditeľnosti. Tento fakt je zapríčinený tým, že FSO systémy používajú pre komunikáciu optické lúče, ktoré nie sú schopné prejsť cez prekážky, ako sú napríklad steny alebo stromy. Bežne sa používajú na krátke vonkajšie zapojenia pri prepojení dvoch susedných budov. Preto sa v tomto prípade používajú na strane vysielateľa laserové diódy, ktorých optický zväzok je užší ako optický zväzok LED diód. Vďaka tomu majú laserové diódy vyššiu účinnosť elektricko-optickej premeny, ktorá činí približne 30 až 70 %. Laserové diódy majú väčšiu šírku pásma, sú jednoducho modulovateľné, a sú schopné pomerne vysokých prenosových rýchlostí. [1][3]

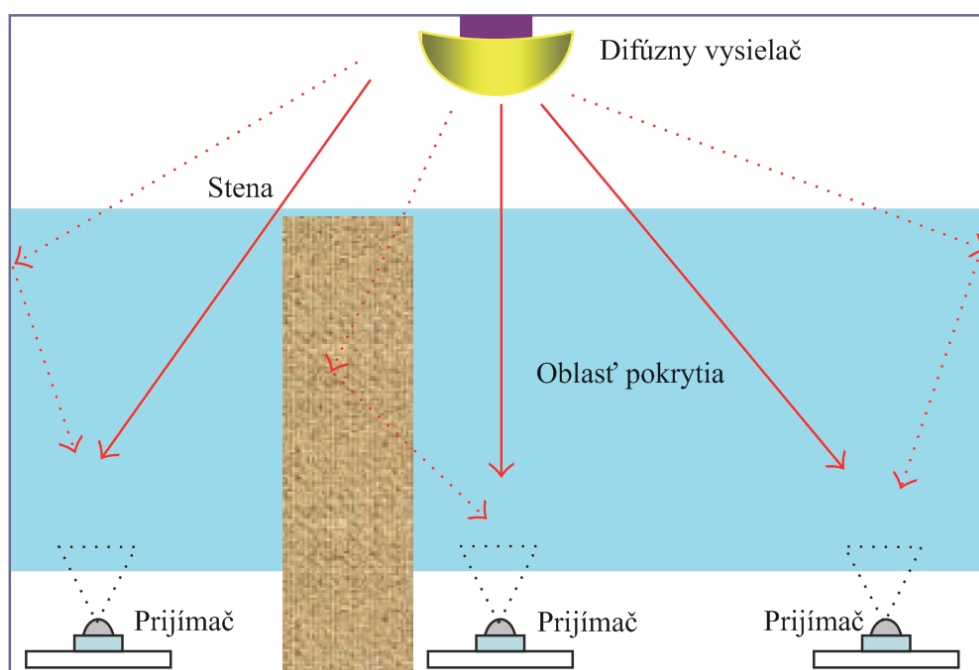
FSO systém Bod-Bod môže operovať v plne duplexnom režime. To znamená, že informácia môže byť prijímaná aj odosielaná paralelne v rovnakom čase. Vnútorný prenosový systém bod-bod sa prevádzkovo nelíši od vonkajšej varianty, avšak jeho návrh je odlišný. V prvom rade musí spĺňať bezpečnostné normy pred poškodením zraku. Vnútorný bezdrôtový optický by mal byť v bezpečnostnej Triede 1, čo vo všeobecnosti znamená, že optickým zdrojom musí byť LED dióda. Z toho dôvodu sa zmenší aj kapacita linky na rádovo desiatky $\text{Mbp}\cdot\text{s}^{-1}$, v porovnaní s vonkajšími linkami, ktorých kapacita linky dosahuje rádovo jednotky $\text{Gbp}\cdot\text{s}^{-1}$. Na druhej strane, vnútorné systémy nevyžadujú žiadne ochrany pred nepriaznivými atmosférickými javmi, ale pracujú na pomerne veľmi krátkych vzdialenostiach.



Obrázok 2.3.1: Schéma zapojenia prenosového systému Bod-Bod

2.6 Popis prenosového systému mobilnej FSO

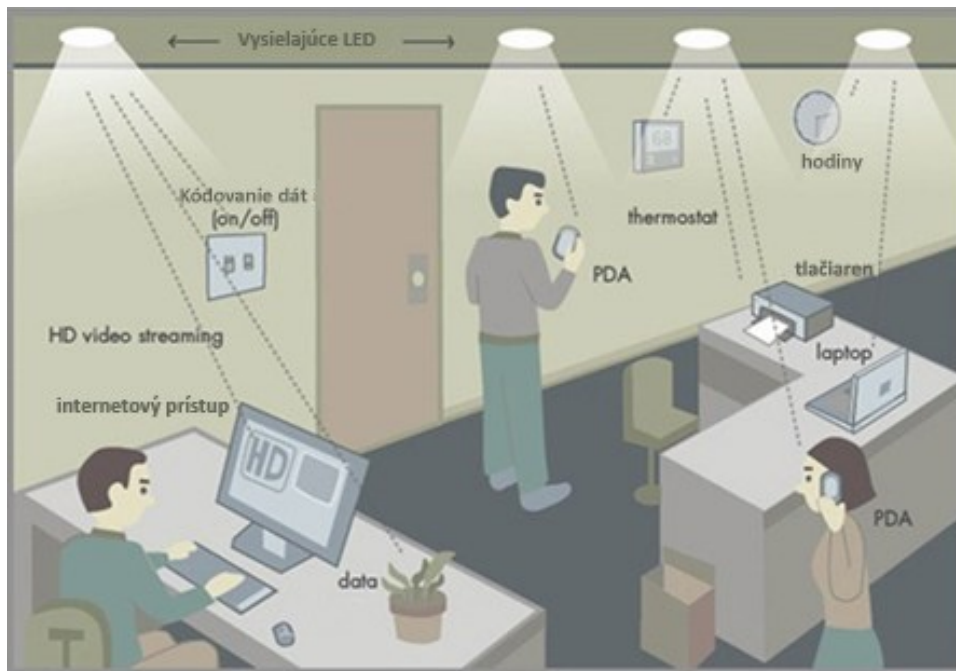
Prenosový systém mobilnej FSO predstavuje zapojenie linky, v ktorej jednotlivé komunikačné prvky nie sú umiestnené na permanentnom mieste, ale sú navzájom v pohybe. Termín „mobilná FSO“ teda predstavuje bezdrôtové optické linky so schopnosťou mobility terminálov. Pod týmto systémom mobilnej FSO linky si môžeme predstaviť aj jednotlivé výzvy, ktoré musí linka spĺňať, aby sa stala efektívnou pre jej využitie. Hlavným problémom je nekompatibilita vysielača a prijímača počas ich pohybu. Tieto zapojenia sú predovšetkým určené pre vnútorné zapojenia v rámci jednej miestnosti s využitím rozptýlenia optického lúča. Nakoľko jediný optický vysielač má limitovaný výkon, tieto systémy sa využívajú predovšetkým na krátke vzdialenosti, väčšinou na pár metrov.



Obrázok 2.4.1: Vnútorný mobilný FSO systém [5]

Vnútorný mobilný FSO systém ponúka svoje využitie najmä v kancelárskych priestoroch, kde je difúzny vysielač umiestnený väčšinou na strop tak, aby efektívne pokryl čo najväčší rádius v miestnosti. Tento vysielač môže byť priamo zabudovaný v osvetlení v prípade, že na osvetlenie miestnosti sú použité LED žiarovky. Takýto FSO systém vysiela dáta pomocou LED žiarovky počas bežného osvetlenia miestnosti, ktoré poskytuje toto osvetlenie. Pritom samotné vysielanie nie je rozpoznateľné okom počas bežného svietenia žiarovky. Budúcnosťou tohto zapojenia by mohlo byť zosieťovanie zariadení v takomto prostredí. Od osobných počítačov, laptopov, tlačiarň, tabletov a telefónov až po bežné elektrické zariadenia. Jeho využiteľnosť je takmer neobmedzená a bezdrôtový štandard zariadení je stále vyhl'adávannejší a žiadanejší. Z toho dôvodu poskytuje FSO alternatívu k už vybudovanej rádio - frekvenčnej komunikácii.

V súčasnosti sa už vo svete nachádza vybudovaná sieť, ktorá má 15 miliárd potencionálnych vysielačov. Sú nimi žiarovky, ktoré nájdeme na každom kroku a poskytujú nám osvetlenie okolia. Pre ich využitie v FSO technológií je potrebné ich vymeniť za energeticky menej náročnejšie LED žiarovky.



Obrázok 2.4.2: Využitie vnútorného prenosového systému mobilnej FSO [6]

Osobitné využitie mobilnej FSO môžeme nájsť v osvetlení, ktoré sa nachádza vo vnútri nemocníc a lietadiel. Používanie rádio - frekvenčných zariadení v nich býva totižto z bezpečnostných dôvodov často zakázané. Z tohto pohľadu sa javí prenosový systém mobilnej FSO ako vhodná alternatíva pre využitie v týchto priestoroch.

Mobilné FSO systémy sa vyžívajú aj vo vonkajších priestoroch. Ekvivalentným zapojením ku kancelárskemu prenosovému systému je zapojenie s využitím pouličného osvetlenia. V tomto prípade sa vysielač nachádza nad cestami a chodníkmi väčšinou vo vhodnej výške, umiestnený na konci pouličných lúčov. Následne môže byť jednoducho vytvorená logická automobilová infraštruktúra V2I, ktorá zlepši plynulosť a bezpečnosť premávky. Vzájomne komunikujúce zariadenia si budú navzájom podávať svoju polohu, rýchlosť a plánovanú trasu. Inteligentný systém tieto dáta spracuje a bude schopný predvídať nebezpečné situácie ohrozujúce život, zdravie a škody, nakoľko pomocou asistovaného ovládania vozidla vhodne prípadným nebezpečenstvám zabráni. Logicky bude podľa počtu vozidiel riadiť premávku na križovatkách a hlavných ťahoch takým spôsobom, aby bola premávka plynulá a efektívna. Táto vízia sa možno zdá ako ďaleká budúcnosť, avšak automobilné spoločnosti testujú čoraz zložitejšie a inteligentnejšie bezpečnostné systémy. Je preto pravdepodobné, že tieto technológie sa budú dômyselne vyvíjať aj v blízkej budúcnosti.

Mobilné FSO systémy sú používané aj v oblasti armády. Priekopníkom ich využívania je Americké vojnové letectvo, ktoré využíva a zatiaľ predovšetkým vyvíja túto technológiu v leteckej komunikácii. U.S. Air Force má plány v hodnote až 7.6 miliardy USD financovať letecké laserové terminály, ktoré by boli používané na platformách ako Global Hawk UAV, prieskumné lietadlo U-2, E-3 Airborne varovný a kontrolujúci systém, E-8 Joint stars, či E-10 viac účelové príkazové lietadlá. [7]



Obrázok 2.4.3: Využitie FSO v Americkom letectve [7]

Pre ich plnohodnotné využitie je potrebná vysokokapacitná linka schopná rýchlostí rádovo v $\text{Gbp}\cdot\text{s}^{-1}$. Preto použitie LED diód ako vysielacej časti bolo v týchto podmienkach nemožné. Podstatným rozdielom oproti mestskému zapojeniu je teda odlišný vysielateľ optického lúča. V týchto prípadoch sa používa laserová dióda pre jej užší optický lúč a šírku pásma. Vďaka nim je možné dosahovať naozaj vysokých rýchlostí v systémoch, ktoré sú dátovo objemne vysoko náročné. Problémom je, že tieto letecké zariadenia sa pohybujú relatívne vysokými rýchlosťami a preto je nesmierne dôležité, aby bol tento systém schopný udržiavať spojenie nepretržite. Určenie polohy LOS vysielateľa pre FSO linku je v porovnaní s rádiový frekvenčnými linkami vo všeobecnosti zložitejšie. Preto je potrebné vyvinúť dômyselné zameriavacie, sledovacie a trackovacie zariadenia, ktoré sú schopné zistiť polohu vysielaného optického lúča.

Počas mnohých rokov firmy ako Terabeam, AirFiber a LightPointe inštalovali terminály za okná, na strechy a na vonkajšie držiaky. Tieto systémy boli určené pre klientov, ktorí vyžadujú širokopásmové pripojenie bez ďalších komplikácií a vyššej ceny vláknového optického pripojenia. Výkon týchto terminálov bol ohromujúci s prenosovými rýchlosťami až $2.5 \text{ Gbp}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnotami BER okolo 10^{-9} . Avšak, nakoľko tieto terminály nie sú upevnené na mobilných platformách, ich dosah je podstatne limitovaný. Pohybuje sa okolo štyroch kilometrov.

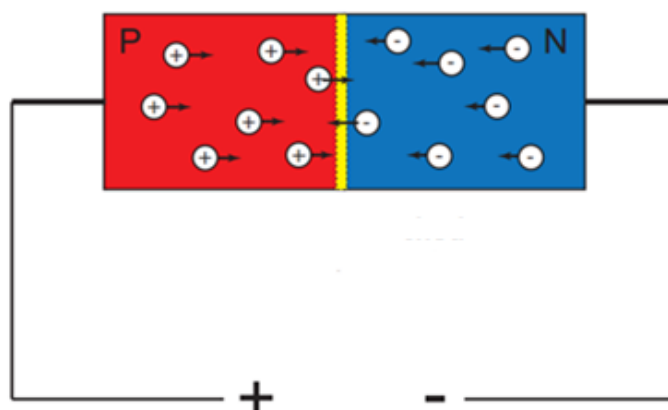
3. Optoelektronické prvky

Zdroje optického vyžarovania patria do vysielacej časti bezdrôtového optického spoja, v ktorých dochádza k premene elektrického signálu na optický signál. Ich hlavnou úlohou je transformovať elektrický signál, ktorý predstavuje prenášanú informáciu do podoby svetelných impulzov. Pri výbere zdroja vyžarovania je potrebné zvoliť zdroj, ktorý zodpovedá prenášanej vzdialenosti. V moderných FSO systémoch existujú viaceré zdroje optického vyžarovania pre prenos dát pomocou bezdrôtovej optickej komunikácie. My sa zameriame na optoelektronické prvky, ktoré sú polovodičovými súčiastkami. Dôvodom je, že sú najčastejšie používané vo vysielacej časti FSO systémoch.

3.1 LED diódy

Diódy vytvárajú optický signál pomocou spontánnej emisie, fotóny sa generujú nezávisle na sebe. Diódy sú elektronické súčiastky s dvoma elektródami, ktoré pre jednu polaritu prieložného napätia prepúšťajú elektrický prúd a pre opačnú polaritu bránia jeho prietoku. K dosiahnutiu tohto ventilového účinku sa v pevných látkach využíva energetická bariéra na styku dvoch oblastí odlišných vlastností, ktorú je možné prieložným napätím vhodnej polarizácie znížiť, a napätím opačnej polarizácie naopak zvýšiť. Najviac používanou bariérou je v súčasnosti P-N prechod a predchod kov-polovodič. Preto sú LED diódy polovodičové súčiastky. Polovodiče sú látky zo štvrtej skupiny periodickej tabuľky, ktoré sú za normálneho stavu nevodivé. Rozlišujeme dva typy vodivosti:

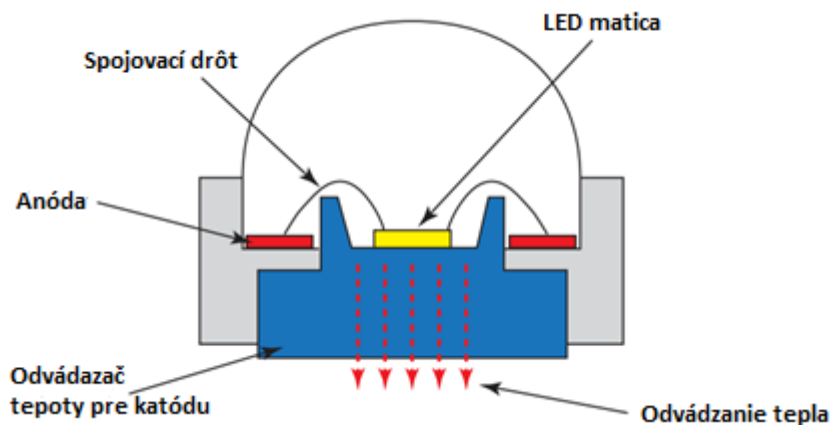
- a) Vlastná – látka sa stáva vodivou pomocou pôsobenia vonkajších javov ako je teplota, tlak a svetlo -Typu P
- b) Nevlastná –pomocou pridávaním prímiesí do kryštalickej mriežky-Typu N



Obrázok 3.1.1: Prietok cez PN prechod LED diódy

Výhodou LED diód je ich nižšia cena, dlhá životnosť a relatívne široké optické spektrum. LED majú prirodzene pri vysielaní širšie pokrytie lúčom a sú vhodnejšie pre nesmerové spojenia.

Dosiahnutie bezpečnosti pred poškodením zraku u LED diódach je oveľa jednoduchšie ako pri LD diódach, ktoré majú nebezpečný úzky priamy lúč. Napriek nespočetným výhodám LD diód sú v komerčných systémoch pre krátke vzdialenosti používané prevažne LED diódy. Primárnym faktorom pre výber LED diódy v týchto systémoch je ich schopnosť pracovať vo vlnových dĺžkach 800nm až 1000nm. Ich ďalšou výhodou je pokrytie väčšej plochy v miestnosti. Touto vlastnosťou je preto možné zabezpečiť komunikáciu medzi viacerými terminálmi zároveň. Nie sú schopné dobrej smerovosti optického zväzku, a nevýhodou LED diód je ich malá šírka pásma. Preto prenosové rýchlosti rádovo dosahujú hodnoty $10 \text{ Mbp}\cdot\text{s}^{-1}$. V niektorých špecifických zariadeniach sa môže táto rýchlosť pohybovať v okolí $100 \text{ Mbp}\cdot\text{s}^{-1}$. LED diódy sú preferované vďaka ich nízkej cene a jednoduchému obvodovému zapojeniu. Majú ale pomerne nízku účinnosť a pomalé operačné rýchlosti v porovnaní s laserovými diódami. [8][9][10]



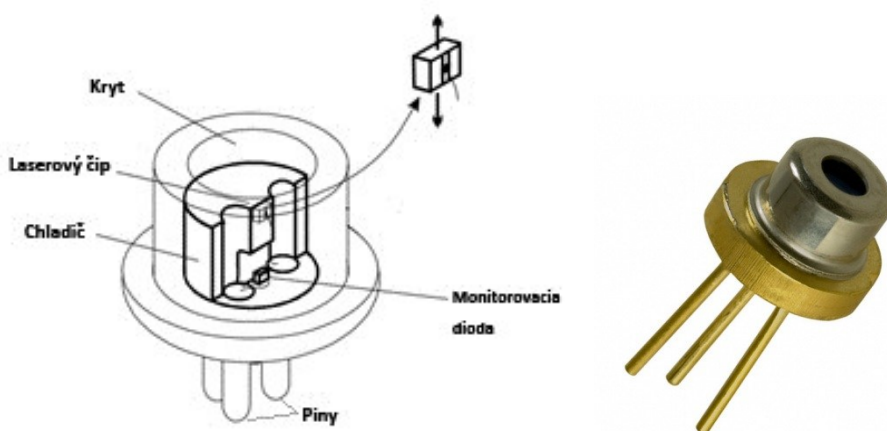
Obrázok 3.1.2 : Prierez LED diódy[10]

3.2 Laserová Dióda

Laserová dióda je svojou funkčnosťou podobná LED diódam, ale zároveň je odlišná v jej samotnej charakteristike a funkčnosti. Vo svojej činnosti používa proces stimulovanej emisie. Vyžiarenie fotónu prebieha počas rekombinácií. Jeden elektrón budí druhý fotón, pričom prvý fotón nezaniká a takto vzniká vzájomná reťazová reakcia.

Za priekopníka v laserovej optickej technológii sa považuje aj Albert Einstein. Touto myšlienkou sa zaoberal v roku 1916. Dovtedy vedci verili, že fotón môže vzájomne s atómom pôsobiť iba v dvoch prípadoch. V prvom, keď fotón môže byť absorbovaný a zvýši hodnotu energie atómu, alebo v druhom, keď fotón môže byť emitovaný pomocou atómu, keď je jeho hodnota energia nízka. K jeho realizácii však došlo až o päťdesiat rokov neskôr v roku 1960 v období, kedy fyzika a technológia polovodičov dosiahla určitého stupňa vývoja. V dnešnej dobe je laserový paprsok vyžívaný vo viacerých navzájom diametrálnych oboroch. Jeho potreba je predovšetkým v tých oblastiach, kde sa kladie dôraz na presnosť a malé odchýlky. Laser našiel svoje využitie pri meraniach vzdialenosti, rezaní oceľových plechov, zameriavaní letiacich telies, obrábaní tvrdých materiálov, pri zameriavaní cieľov, v presných chirurgických nástrojoch a v mnohých ďalších odvetviach. V spojení s výpočtovou technikou je používaný v laserových mechanikách, napájaní optických vlákien a v prenose informácií. Tento spôsob prenosu optického lúča je už známy z prenosu optického lúča po optických vláknach. LD diódy boli používané v tomto odvetví, nakoľko majú vysoké optické výkony a ich koherencia je niekoľko krát väčšia. [1]

Krátke vlnové dĺžky blízko 850 nm sú žiadajúcimi pre dostupnosť lacných laserových diód a silikónových fotodetektorov. Zníženie bezpečnostných podmienok pri dlhších vlnových dĺžkach by umožnilo použitie silnejšieho zdroja svetla a v skutočnosti aj vyšší bit rate, avšak táto skutočnosť by mala priamy vplyv na vysokú cenu. Na druhej strane, kratšie vlnové dĺžky svetla sú vhodné pre dátové prenosy v rýchlostiach do $100\text{Mbp}\cdot\text{s}^{-1}$. Najväčšou výhodou LD diód je ich vysoká energetická účinnosť, vysoká modulačná šírka pásma a ich relatívne úzka spektrálna šírka. Laserové diódy emitujú rovný optický lúč a pre svoju činnosť potrebuje difúzivnú šošovku, alebo iný optický systém preto, aby sa tento lúč mierne rozšíril. Nakoľko zväčšenie pokrytého priestoru zvyšuje zdravotné nebezpečenstvo pred poškodením zraku, v niektorých prípadoch zapojení môžeme uprednostniť LED diódu pred LD diódou. Vďaka veľmi presnému nasmerovaniu sú odposluchy v FSO systémoch s LD diódami takmer nemožné. [3]



Obrázok 3.2.1: LD dióda

3.3 Porovnanie LED a LD diód

Tabuľka 3.1: Vzájomné porovnanie LED a LD diód

Zdroj vyžarovania	LED	LD
Bežné využitie v FSO	Mobilné	Bod-Bod
Energetická náročnosť	Nízka	Veľmi nízka
Vlnová dĺžka	245-7000 nm	263-13900 nm
Spektrálna šírka	20-100 nm (10-50 THz)	< 10-5 do 5 nm (< 1 MHz až 2THz)
Prenosové rýchlosti	100 Mbps	10 Gbps
Bezpečnosť pred poškodením zraku	Považované za bezpečné	Považované za nebezpečné
Cena	Nízka	Stredne vysoká až vysoká

V tabuľke 3.1 je vyjadrené vzájomné porovnanie vyžarovacích zdrojov pre FSO siete. [8]

4. Detekory optického žiarenia

Úlohou detektoru optického žiarenia je premena optického výkonu na elektronický signál. Ich hlavnou časťou sú fotodetektory, ktoré konvertujú svetlo na elektrické napätie pomocou fotoelektrického javu. Detektory optického žiarenia používajú rôzne fyzické javy pre detekciu svetla. Väčšina detektorov použitých v komerčnej sfére FSO systémov je založených na polovodičových fotodiódach. Fungujú na rôznych vlnových dĺžkach v závislosti na špecifických materiáloch, z ktorých sú vyrobené. Podstatou princípu fungovania fotodetekcie je proces absorpcie svetla atómami pri vhodných podmienkach. Na fotodetektore prebieha premena toku alebo energie optického žiarenia na meraný parameter. Býva ním elektrická veličina ako napr. prúd, napätie, vodivosť či kapacita. Premena optického toku na el. signál vykazuje často krát časové oneskorenie spôsobené viacerými limitujúcimi faktormi počas procesu detekcie. Využitie fotodetektorov je pomerne široké. Svoje uplatnenie našli v optických komunikačných systémoch, meteorológii, v senzorických systémoch či v automatizačnej a výpočtovej technike. Neustály vývoj optických detektorov kladie dôraz na ich zlepšenie vlastností. Hlavný dôraz sa kladie predovšetkým na zvyšovanie citlivosti, rýchlosti, znižovanie šumu detektorov a ich rozmerov. Ideálny detektor má veľmi nízku citlivosť P_{min} a vysokú účinnosť konverzie, čo vo svojej podstate znamená, že detektuje každý fotón. Má okamžitú odozvu na zmenu optického signálu a zanedbateľný šum. Takýto detektor optického žiarenia zatiaľ neexistuje a cieľom vývoja je sa čo najbližšie priblížiť hodnotám ideálneho detektora.

4.1 PN fotodióda

PN fotodióda je plošná polovodičová dióda, ktorá je konštrukčne upravená tak, aby do oblasti PN prechodu preniklo svetlo optického signálu. V prípade, že prechod nie je osvetlený, sa dióda správa ako bežná polovodičová dióda. Princíp PN fotodiódy je založený na vnútornom fotoelektrickom jave. Fotón, ktorý dopadá na prechod PN, narazí do elektrónu vo válečnej vrstve atómu a predá mu svoju energiu. Tento elektrón energiu fotónu absorbuje a získa dostatok energie k opusteniu válečného pásma. Elektrón následne preskočí do vodivostného pásma. To znamená, že elektrón opustí vlastný atóm a pohybuje sa v priestore kryštálovej mriežky. Vznikol tak voľný elektrón a na jeho mieste vzniká diera. Elektróny, ktoré vznikli týmto spôsobom, sú voľné nosiče náboja a znižujú elektrický odpor polovodiča. Samotný vplyv osvetlenia prechodu môžeme sledovať v polarizácii diódy v závernom smere, kedy dochádza k lineárnemu rastu anódového prúdu pri rovnomernom zväčšovaní osvetlenia. PN dióda má vďaka veľkej kapacite PN prechodu nízku prenosovú rýchlosť a teda nie je až tak obľúbenou v použití pre FSO technológie. [1]

4.2 PIN fotodióda

PIN diódy riešia problém pomalej odozvy a sú najčastejšie používanými polovodičovými detektormi v FSO technológii. Medzi PN prechod bola pridaná ďalšia oblasť I. Oblasť I predstavuje oblasť s intriniskou vodivosťou kryštálu, v ktorých sú prímiesy kompenzované iónmi lítia. PIN detektor je v FSO systémoch väčšinou menej vhodnejší pre použitie, pretože je približne o 10-15 dB menej citlivejší ako APD dióda. Prijímače PIN sú vo všeobecnosti používané vďaka ich nízkej cene, širokej tolerancii na zmenu teploty a pre ich pracovanie s nízkymi napäťovými zdrojmi. [1]

4.3 Lavinová APD dióda

Lavinová fotodióda je polovodičový detektor s vnútorným zosilnením. Vďaka vnútornému zosilneniu je schopná zvýšiť svoju citlivosť, pomocou tranzistorového obvodu. To má následne priaznivý vplyv na pomer SNR v porovnaní s externým zosilnením signálu. Vďaka zvýšenej citlivosti je zabezpečená minimálna energetická náročnosť. V porovnaní s Pin diódami sú APD diódy drahšie a vyžadujú aj vyššie nároky na ich napájanie. [3]

5. Prenosové médium

Optická bezdrôtová sieť využíva ako prenosové médium pre svoju komunikáciu voľný priestor. V nepriaznivých podmienkach môže byť prenos dát zložitý, niekedy až nemožný. Tieto podmienky sú spravidla ovplyvnené sezónnym a aktuálnym počasím. Jedným z riešení nepriaznivých podmienok, ktoré spôsobujú nižšiu viditeľnosť, je skrátenie vzdialenosti jednotlivých FSO terminálov. Vzdialenosť ovplyvňuje výkon FSO systémov v troch oblastiach. Prvá je nezávislá od počasia. Laserový paprsek podlieha divergencií lúča, čím sa jeho sila znižuje a detektor potom prijíma slabší optický lúč. Druhým faktorom je, že celková strata signálu paprsku narastá so zväčšujúcou sa vzdialenosťou. Tretím faktorom je, že s narastajúcou sa vzdialenosťou sa akumuluje scintilačný efekt, ktorý nastáva pri odrazení sa paprsku na kvapkách počas dažďa. Ďalším nepriaznivo ovplyvňujúcim faktorom môže byť narušenie linkového spojenia. Väčšina spojení bezdrôtových optických sietí je momentálne vybudovaná v priestoroch medzi budovami. Jedná sa prevažne o zapojenie bod-bod, ktoré sú od seba vzdialené približne štyri kilometre. Pre túto vzdialenosť sa používa ako zdroj optického žiarenia LD dióda. Je vhodnejšia na väčšie vzdialenosti a ponúka širšiu šírku pásma.

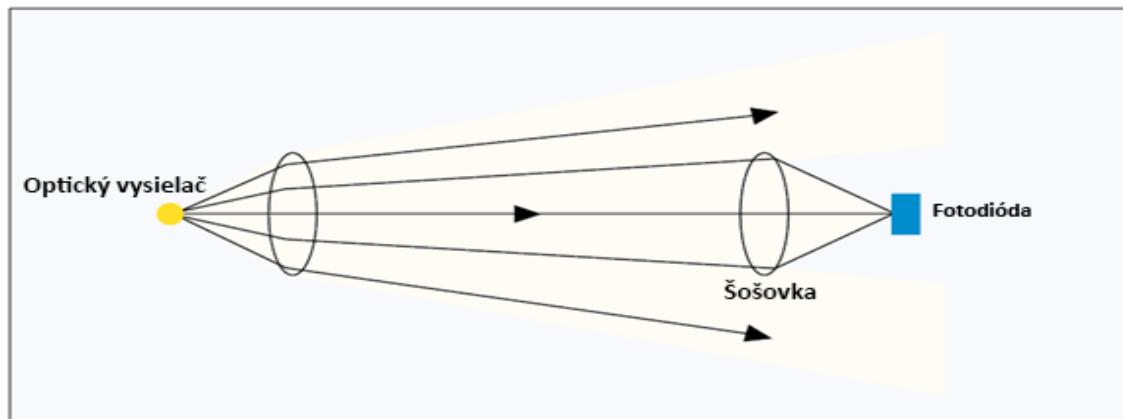
Tak, ako každý bezdrôtový systém, aj rozpočet pre optický bezdrôtový systém je silno závislý od atmosférických strát po ceste šírenia signálu. Nakoľko sú vnútorné priestory bez prírodných zložiek, ktoré degradujú silu signálu akými sú opar, hmla, oblaky a iné prekážky, ktoré sa bežne vyskytujú vo vonkajších priestoroch, tak u vnútorných optických bezdrôtových systémoch počítame iba s útlmom signálu a stratou optického signálu v priestore, ktorý sa označuje ako Free space loss.[14]

5.1 Útlm signálu

Tento jav je pozorovateľný vo vnútorných aj vonkajších optických bezdrôtových systémoch, kde je laserový lúč ovplyvňovaný veľkou radou podmienok a činiteľov. Jednu zo skupiny činiteľov môžeme pomenovať ako meteorologické javy. Patria medzi ne dážď, hmla, sneh, vietor, búrky a atmosférické turbulencie. Je však dôležité si uvedomiť, že výskyt týchto činiteľov sa líši od lokality. Pre rôzne lokality platia niekedy mierne rôznejšie podmienky. Jedná sa napríklad o lokality ako sú vnútrozemské alebo prímorské oblasti, alebo oblasti s rôznou nadmorskou výškou.

5.2 Free space Loss

Free Space Loss je tá časť signálu, ktorá je stratená alebo nezachytená pomocou clony prijímača. Pri zapojení point to point ktorý pracuje s lúčom mierne rozbiehavým, tieto straty predstavujú 20dB a vo vnútorných systémoch používajúce širokohlý lúč majú free space loss 40dB a viac. [1]



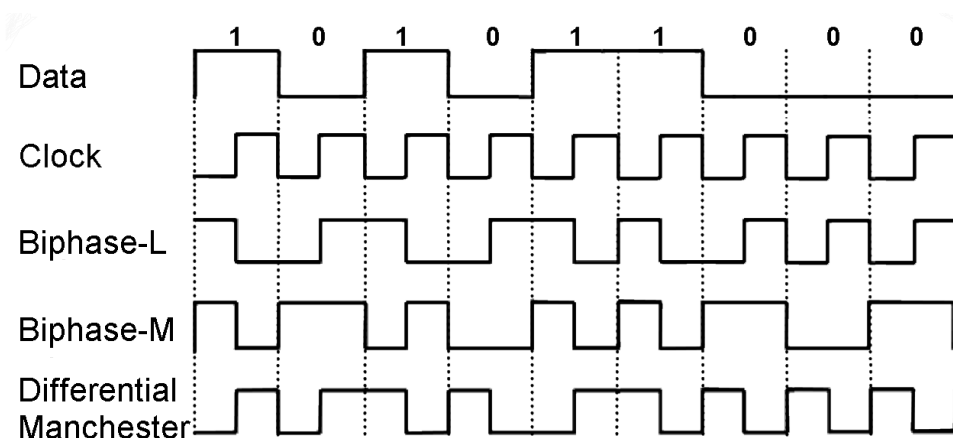
Obrázok 5.1: Schematická reprezentácia Free space loss [15]

6. Požiadavky na Modulátor

Pre možnosť používania mobilnej FSO siete vo verejných priestoroch je potrebné, aby modulátor spĺňal určité podmienky komunikácie. V porovnaní s laserovými FSO sieťami, ktoré používajú na prenos IR lúče, pracujú mobilné FSO siete prevažne vo viditeľnom optickom spektre. Zdrojom vysielacieho lúča sú LED diódy, ktoré sú zároveň použité aj na osvetlenie priestorov. Je preto kľúčové, aby nebolo možné rozpoznať ľudským okom rozdiel medzi normálnym a modulovaným svetlom.

6.1 Modulácia a kódovanie

Úlohou modulátora je udržiavať stabilnú hodnotu prenášaného signálu tak, aby nenastali žiadne napäťové výkyvy v obvode počas komunikácie. Pre túto činnosť je preto dôležité vhodne navrhnuť modulátor a vybrať vhodnú moduláciu signálu. Jednoduché modulovanie s On-Off kľúčovaním by sa na prvý pohľad mohlo zdať postačujúcim. On-Off kľúčovanie (OOK) pracuje na systéme, kedy pri logickej 0 svetlo nesvieti, čiže OFF. Pri logickej 1 sa svetlo naopak rozsvieti. Problém nastáva však v prípade, kedy za sebou nasleduje dlhá sekvencia logických núl. Svetlo v tom prípade prestane na určitú dobu svietiť a počas tejto doby môže nastať okamih, kedy môže byť priebeh komunikácie pozorovateľný. Tomto stavu je potrebné sa vyhnúť. Preto je potrebné doplniť OOK moduláciu vhodným linkovým kódom.

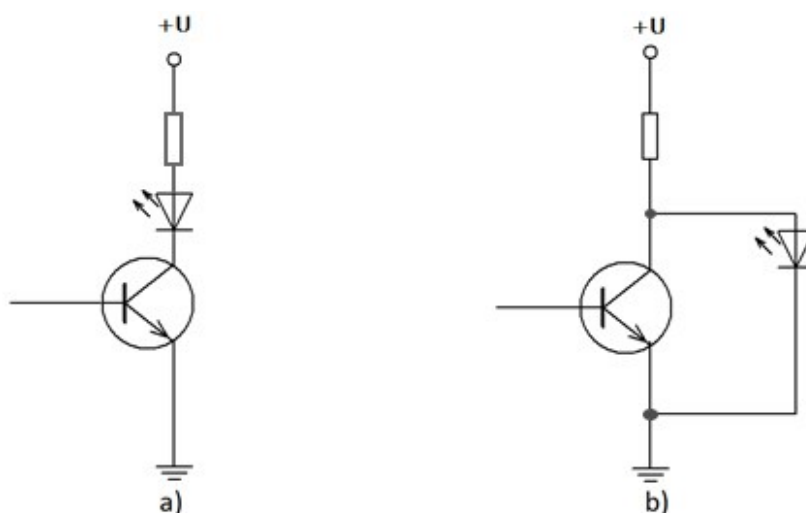


Obrázok 6.1: Linkové kódy vhodné pre prenos vo viditeľnom spektre [16]

Linkové kódy, ktoré sú zobrazené na Obrázoku 6.1 udržiavajú stabilnú hodnotu prenášaného signálu. Riešia problém pozorovateľnosti komunikácie a sú vhodné pre prenos vo viditeľnom spektre. Ako vhodnú kombináciu s OOK moduláciou sme vybrali Diferenciálne kódovanie Manchester. Kódovanie pomocou Diferenciálneho Manchesteru patrí medzi unipolárne kódy. Jeho signál pozostáva z hodnôt jednej polarizácie elektrického napätia v kombinácii s nulovým napätím. Logická hodnota sa sníma na nábehovej hrane bitového intervalu. Zmenu úrovne, čiže prechod z jednej úrovne do druhej predstavuje logická 0. Pre zotrvanie v tej istej hodnote úrovne je použitá logická 1. Synchronizácia kódu je zaistená pomocou zmeny úrovne na nábehovej hrane bitového intervalu. Diferenciálny Manchester sa používa napríklad aj v protokole Token ring. [16][17]

6.2 Spotreba energie

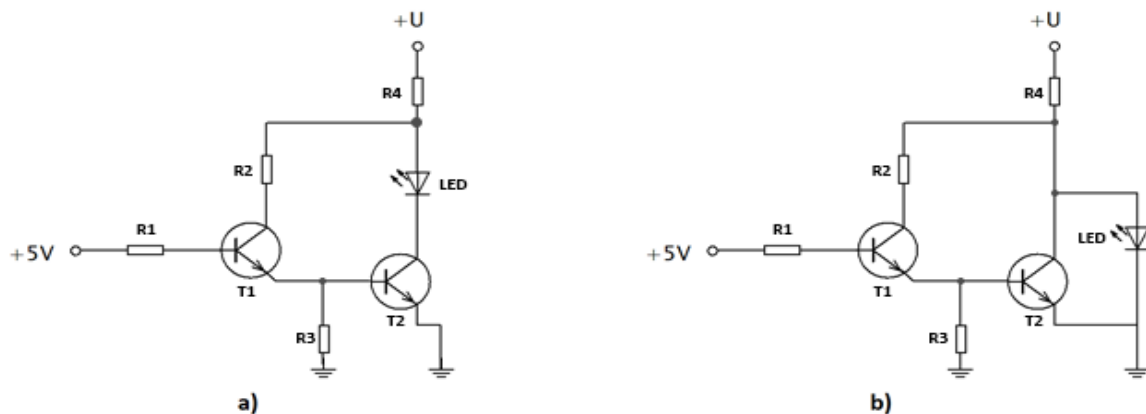
Veľmi dôležitým faktorom pri navrhovaní vysielacej časti mobilnej FSO je dbanie na nízku spotrebu energie, ktorá je kľúčovou výhodou FSO technológie. Je preto potrebné čo najviac minimalizovať spotrebu energie vnútorného obvodu a zároveň prispôsobiť vysielací obvod účelu a podmienkam, v ktorých bude pracovať. Ako vhodným riešením sme sa rozhodli demonštrovať dve základné zapojenia LED diód. Z hľadiska spotreby energie je jedno z týchto zapojení efektívnejšie a to druhé neefektívnejšie. Tieto zapojenia sú navzájom možno na prvý pohľad takmer podobné, no svojou činnosťou sú diametrálne odlišné. LED dióda v zapojení na Obrázok 6.2 a) svieti v prípade, že je tranzistor T1 zopnutý. Avšak na rozdiel od zapojenia b) v ktorom LED dióda svieti len v prípade, že je tranzistor uzatvorený. To znamená, že dióda svieti úplne zbytočne a to aj v prípade, kedy nie sú vysielané žiadne dáta. Táto skutočnosť má veľmi negatívny dopad na celkovú energetickú náročnosť zapojenia a preto sa toto zapojenie bežne nepoužíva.



Obrázok 6.2: Zapojenia pre riadenie výkonových LED

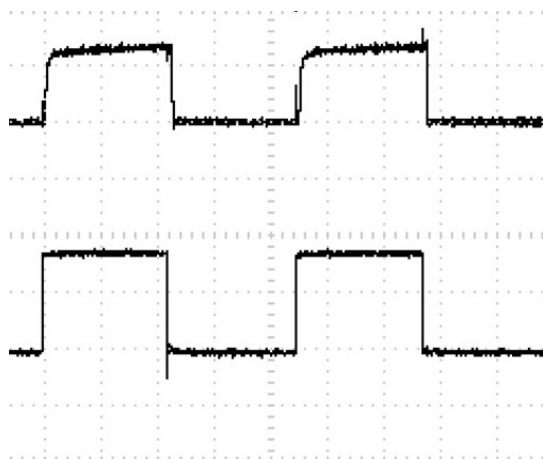
6.2.1 Prehľad vhodných zapojení modulátorov použiteľných pre mobilné FSO siete

Pre zapojenie modulátora vysielacej časti FSO existuje mnoho rôznych a odlišných zapojení. Základné zapojenia, ktoré sú na Obrázku 6.2 (Zapojenia LED a) b)) sú vhodné pre riadenie výkonových LED diód. Pre ich použitie ako modulátora systémoch FSO je ich potrebné ešte modifikovať. Pre zvýšenie zosilnenia signálu zo vstupu bol pridaný do zapojenia ešte jeden výkonový tranzistor. Vhodnú kombináciu oboch výkonových tranzistorov je potrebné správne navrhnuť a následne frekvenčne odmerať. Dôvodom je frekvenčná závislosť tranzistorov a LED diód. Tie počas vysokých frekvenciách nežiadúco menia svoj charakter. Tento krok bližšie priblížime v praktickej časti bakalárskej práce.



Obrázok 6.3: Zapojenia modulátorov použiteľných pre mobilné FSO siete

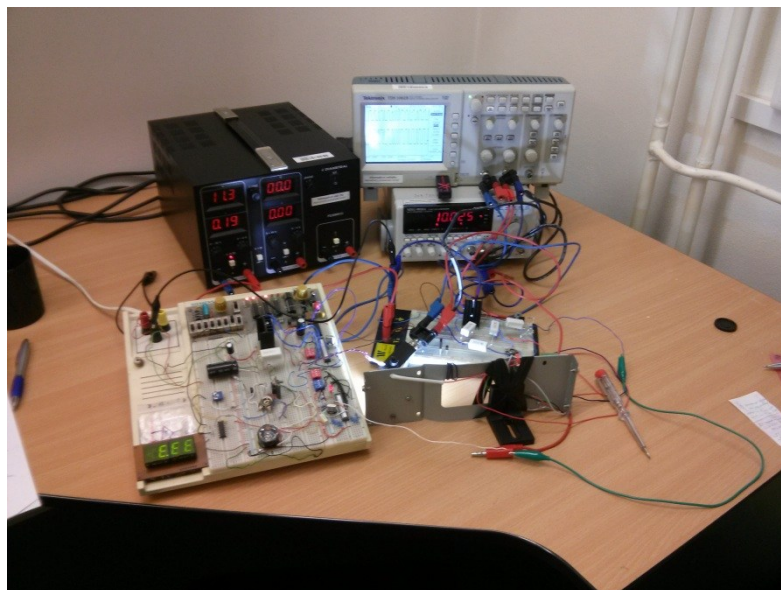
Nakoľko výkonové tranzistory reagujú na zvyšovanie frekvencie poklesom zosilnenia, bolo potrebné vybrať takú dvojicu, ktorá by bola vhodná aj pre vyššie frekvencie. Pre zapojenie sme vybrali viacero výkonových tranzistorov, ktoré sme následne v zapojení otestovali v rôznych kombináciách. Pre testovanie sme mali k dispozícii výkonové tranzistory: BD 337-25, MJE150 326, BD243C, BD 137-16 a darlingtonový tranzistor TIP 122. Podľa zapojenia na Obrázku 6.3 a) sme následne merali frekvenčnú závislosť týchto kombinácií tranzistorov. Na generátore frekvencie sme postupne zvyšovali hodnotu frekvencie rádovo v kHz. Na hodnote 10 kHz boli jednotlivé kombinácie tranzistorov správaním takmer rovnaké alebo veľmi podobné.



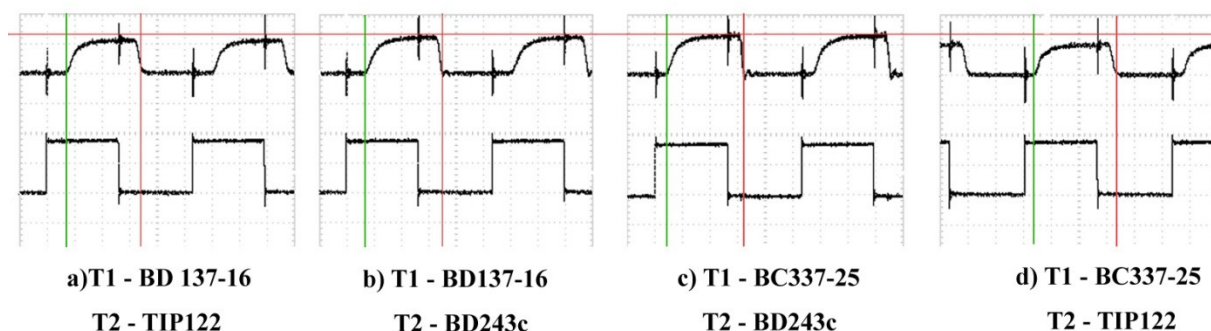
Obrázok 6.4: Vzopnutie a vypnutie LED

Na obrázku Obrázku 6.4 môžeme pozorovať, že doba vzopnutia a vypnutia LED diódy pri frekvencii 10 kHz je takmer identická s generovaným vstupným signálom. Doba vzopnutia je minimálne posunutá voči generovanému vstupným signálu, ktorý leží na spodnej horizontálnej osi. Takisto doba vypnutia zodpovedá požadovaným hodnotám.

Avšak zmeny pri frekvencií 75 kHz boli už ale badateľné. Zo všetkých kombinácií sme nakoniec vybrali štyri dvojice, ktoré dosahovali najlepšie výsledky. Tieto zapojenia sme následne navzájom porovnali.



Obrázok 6.5: Oživovanie oboch zapojení



Obrázok 6.6: Porovnanie správania LED diódy

Na Obrázku 6.6 môžeme vidieť správanie sa LED diódy pri použití rôznych dvojíc tranzistorov na rovnakom zapojení. Porovnané hodnoty boli merané pri konštantnej frekvencii $f=75\text{kHz}$. Zelenou zvislou čiarou je zvýraznená oblasť, kedy začína nábežná hrana LED diódy. Je vhodné, aby táto doba nastala čo najskôr po vybudení generovaného vstupného signálu, ktorý sa nachádza na spodnej horizontálnej osi. Červenou farbou je označená oblasť v ktorej LED dióda zhasla. V tomto prípade je vhodné aby medzera medzi touto oblasťou a koncom intervalu generovaného vstupného signálu bola čo najmenšia. Pod zachyteným príbehom je napísaná použitá dvojica tranzistorov. Snažili sme sa nájsť najlepšiu kombináciu tranzistorov ktoré sme mali k dispozícii. Celkovo sme odmerali frekvenčné charakteristiky deviatich zapojení. Medzi použitými tranzistormi bol aj darlingtonový tranzistor TIP122.

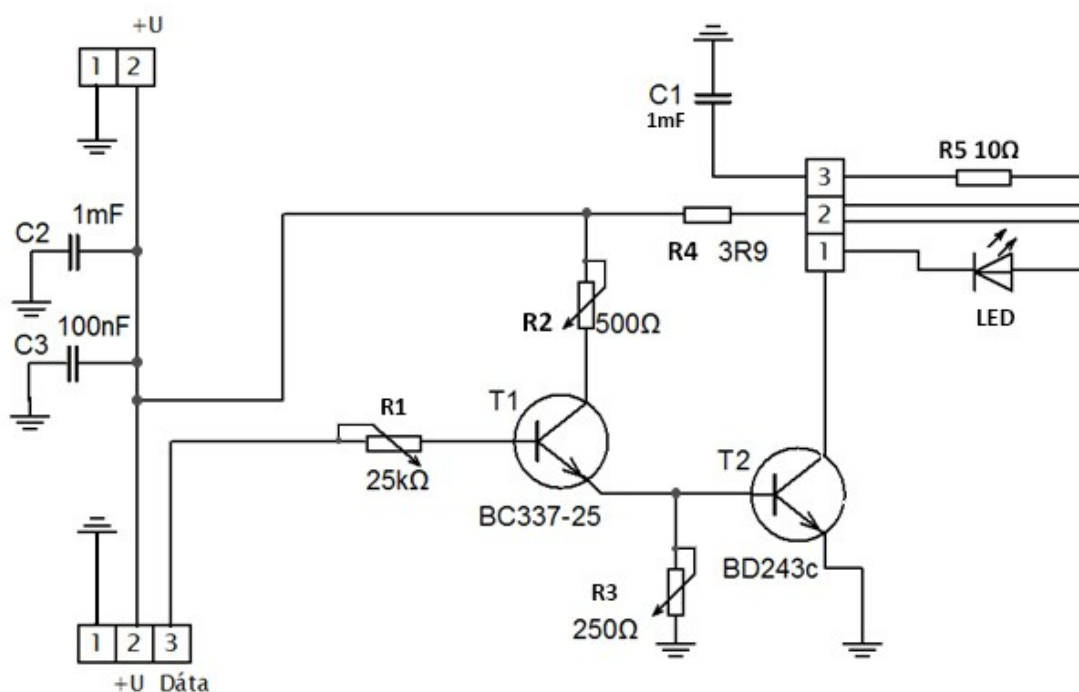
Po porovnaní týchto štyroch dvojíc môžeme konštatovať, že pri vyšších frekvenciách je z týchto dvojíc vhodná dvojica c.) T1=BD 337-25 T2=BD243c. Pretože dokázala najrýchlejšie zopnúť a vypnúť diódu vzhľadom na generovaný vstupný signál.

6.3 Stabilita

Dôležitým parametrom modulátora FSO technológie je jeho stabilita. Modulátor a takisto aj LED dióda podliehajú zmenám svojich parametrov s meniacou sa teplotou a frekvenciou. Zosilnenie tranzistorov klesá s narastajúcou frekvenciou. Je preto dôležité vybrať vhodné tranzistory pre dané zapojenie. Chladenie výkonovej LED diódy je možné do veľkej miery pomocou pasívneho chladenia, ktoré odvádza nadbytočné teplo.

7. Návrh a testovanie modulátora pre mobilné FSO siete

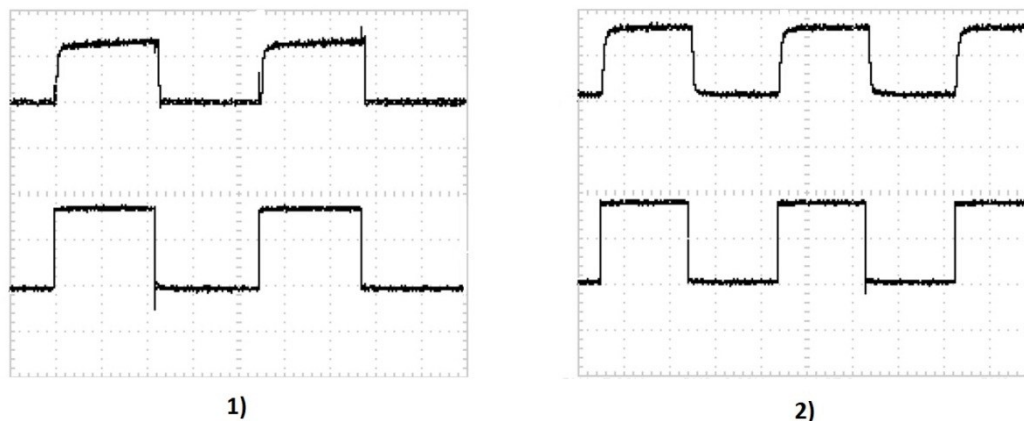
Samotný riadiaci obvod je pomerne jednoduchý. Pozostáva z dvoch tranzistorov s možnosťou nastavenia operačného bodu a filtrácie napájacieho napätia. Zapojenia z obrázku Obrázok 7.1 sme doplnili o filtráciu napájacieho napätia pomocou filtračných kondenzátorov C2 a C3. Usmerňovač tohto typu má záťaž tvorenú činným odporom a vyhladzovacím kondenzátorom. Napätie na takto zaťaženom výstupe usmerňovača už nie je napätie pulzujúce od nulovej hodnoty po maximálnu hodnotu sekundárneho napätia transformátora, ale je to napätie, ktorého hodnota neklesne pod určitú minimálnu hodnotu počas trvania celej periódy. Zdroje s takto realizovanými usmerňovačmi je možné použiť priamo na napájanie väčšiny elektronických obvodov, nakoľko zvlnenie výstupného napätia je výrazne menšie ako pri zaťažení usmerňovača len odporovou záťažou, teda bez vyhladzovacieho kondenzátora.



Obrázok 7.1: Schéma zapojenia modulátora

7.1.1 Pridanie kompenzačného kondenzátora

Ďalšou zmenou bolo pridanie kompenzačného kondenzátora C1 do svorkovnice, spolu s odporom R5. Tento kondenzátor má za úlohu kompenzáciu výstupného napätia. V prípade, že tranzistor T1 nie je zopnutý, tak kondenzátor C1 naakumuluje elektrický náboj, ktorý keď zopne tranzistor T1, dodá výkonovej LED dióde. To má pozitívny dopad na výkon LED diódy, ktorá pri meraniach následne dosahuje vyššie intenzity osvetlenia a rýchlejšie vzopnutie aj vypnutie vzhľadom na vstupný signál. Jej nábežná a dobežná hrana boli teda v porovnaní so zapojením bez kompenzačného kondenzátora kratšie, čo má pozitívny vplyv na modulátor vysielacej časti FSO siete.

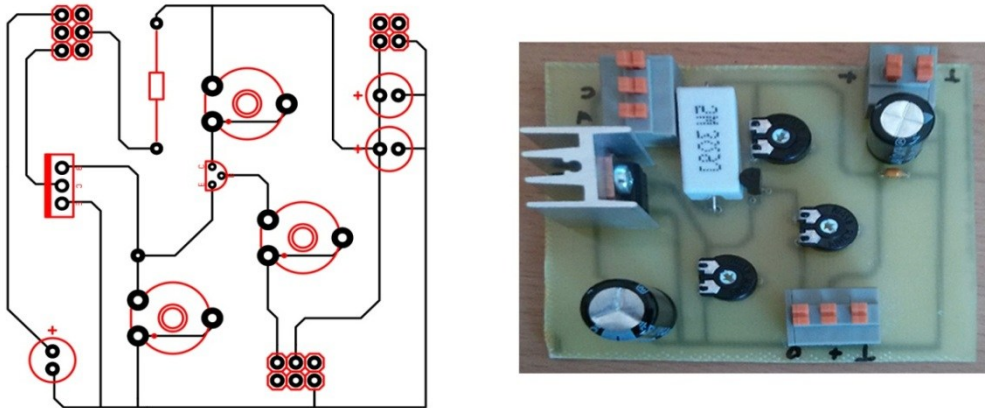


Obrázok 7.2: Porovnanie chovania LED diódy

Na Obrázku 7.2 je znázornené porovnanie chovania výkonovej LED diódy. V prvom prípade sa jedná o zapojenie bez kompenzačného kondenzátora a v druhom prípade s kompenzačným kondenzátorom. Meranie bolo vykonané pri frekvencií 10 kHz. V porovnaní môžeme spozorovať, že prvé zapojenie má odlišný charakter ako druhé zapojenie s kompenzačným kondenzátorom. Dióda v zapojení číslo dva mala pri vzopnutí oveľa kratšiu dobu nábehu ako v zapojení číslo jedna. Takisto dosahovala aj vyššej intenzity, čo má pozitívny vplyv pre zapojenie mobilného FSO modulátora.

7.2 Realizácia plošného spoja modulátoru pre mobilné FSO siete

Elektronika je navrhnutá na plošnom spoji s rozmermi 80 x 67 mm. K jeho návrhu bol použitý software Sprint Layout.



Obrázok 7.3: Návrh a realizácia plošného spoja

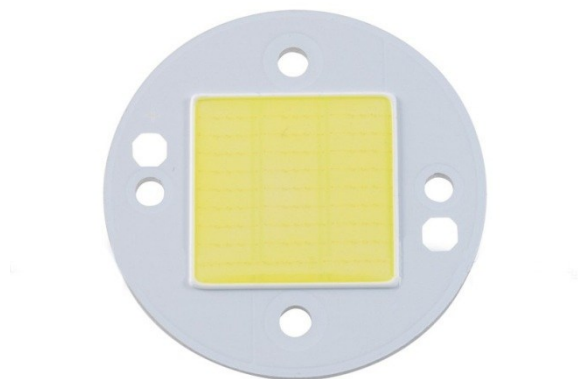
Na obrázku 7.3 je zobrazený návrh zrealizovaného plošného spoja modulátoru pre vysielaciu časť FSO siete. Toto zapojenie bolo potrebné pri ďalších meraniach, ktoré sme vykonali.



Obrázok 7.4: Overenie funkčnosti modulátoru

7.3 Použitá výkonová LED dióda

LED diódy sú mimoriadne náchylné na prevádzkové podmienky, napätie, prúd a teplotu. Pre ich spoľahlivé a stabilné fungovanie je preto potrebné dbať na ich stabilné napájacie napätie a takisto aj na ich chladenie. Často sa totiž tvrdí, že LED dióda nevyžaruje teplo. Podľa nás však tento fakt nie je pravdivý, pretože aj LED vyžaruje teplo. Voči klasickým žiarovkám, ktoré sú v prvom rade žiariče tepla, je ich vyžarovanie zanedbateľné. Pre zapojenia mobilnej FSO sme vybrali výkonovú 5W LED diódu 6000k 5W 500LM/120°. Svojimi vlastnosťami poskytovala totižto dostatočné parametre a požiadavky pre realizáciu vysielacej časti FSO sieť.

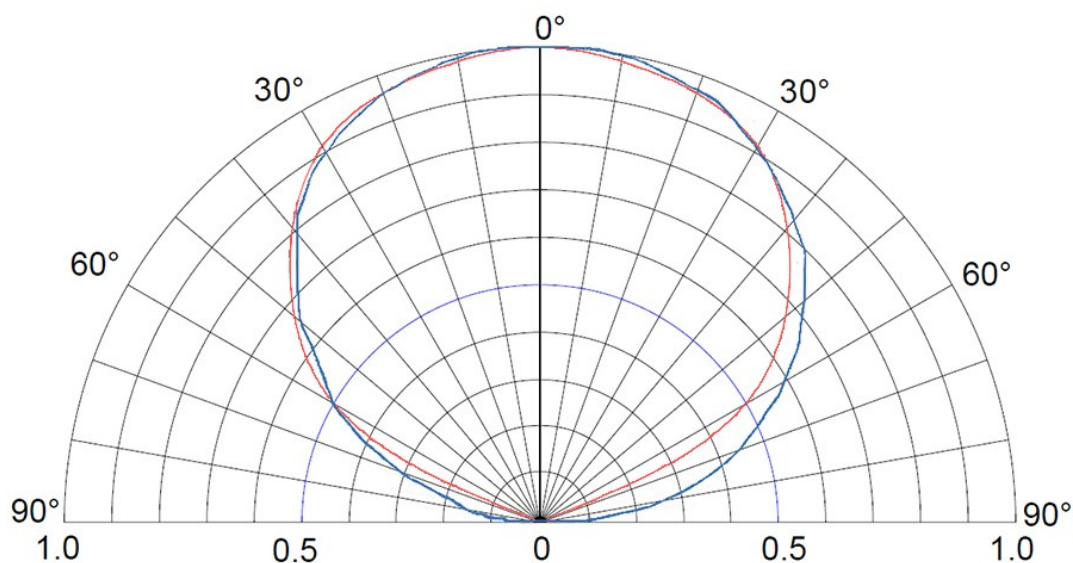


Obrázok 7.5: Výkonová LED dióda [18]

Tabuľka 7.1: Vybrané parametre použitej LED[18]

Parameter	Hodnota	Jednotka
Vyžarovací uhol	120	[°]
Vyžiarený výkon	5	[W]
Napájacie napätie	9,6	[V]
Teplota svetla	6000	[K]
Svetelný tok	500	[lm]
Živostnosť	100 000	[hod]

7.3.1 Meranie smerovej vyžarovacej charakteristiky výkonovej LED diódy

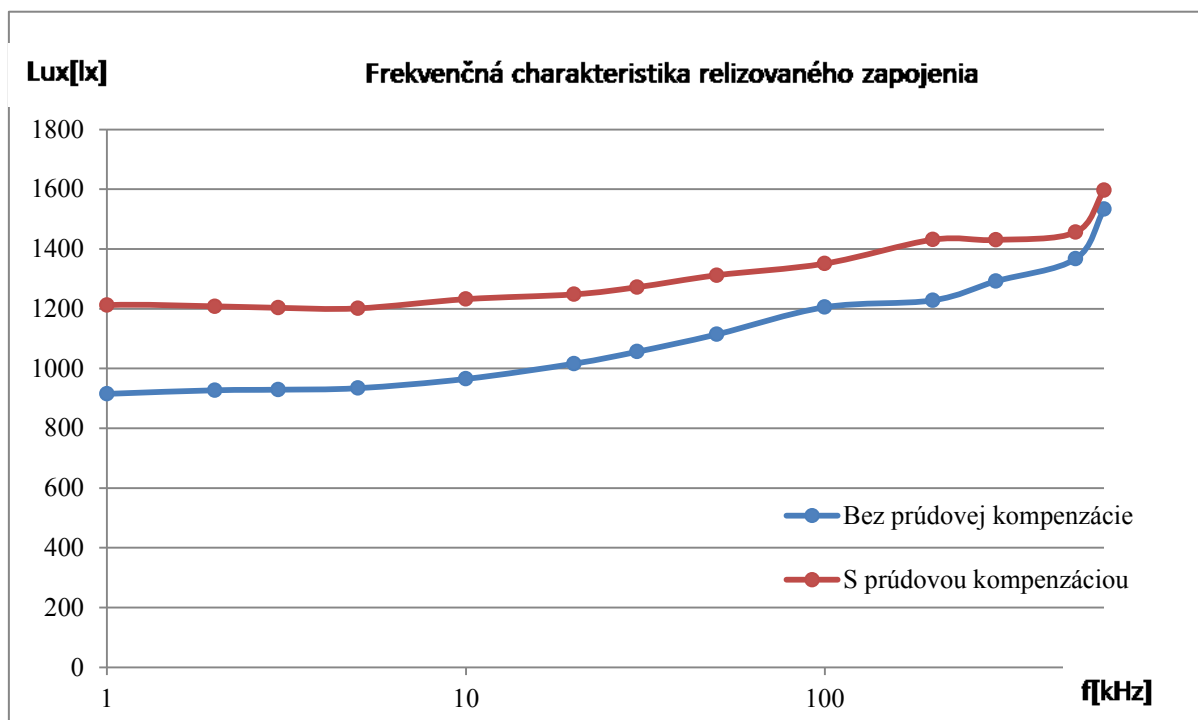


Obrázok 7.6: Vyžarovacia charakteristika

Na obrázku 7.6 je zobrazená vyžarovacia charakteristika výkonovej LED diódy, ktorá bola použitá pri meraniach v zapojení vysielačnej časti FSO siete. Graf sa skladá z dvoch vyžarovacích charakteristík. Vyžarovacia charakteristika červenej farby odpovedá teoretickej vyžarovacej charakteristike, ktorá je uvedená v datasheete danej výkonovej LED diódy. Podľa výrobcu jej vyžarovací uhol odpovedá uhlu 120° . Vyžarovacia charakteristika modrej farby odpovedá vyžarovacej charakteristike, ktorú sme získali pri jej meraní v laboratóriu. Nameraná charakteristika je mierne odlišná od tej, akú uvádza výrobca. Vyžarovací uhol nameranej charakteristiky odpovedá uhlu 126° , čo je dokonca väčší uhol, ako sme pred meraním očakávali. Je to však jednoducho vysvetliteľné. Podmienky, ktoré sme mali pri meraní, boli o niečo jednoduchšie a primitívnejšie ako podmienky pri profesionálnych meraniach vyžarovacích charakteristík v špeciálnych laboratóriách. Najpravdepodobnejším faktorom, ktorý ovplyvnil fakt, že namerané hodnoty sú v miernej odchýlke, bolo odrážané vyžarované svetlo LED. Toto svetlo sa odrážalo od stola, na ktorom bolo položené meracie zariadenie a výkonová LED dióda. Takisto mierne odchýlky mohol spôsobiť Lux meter, ktorý sme pri meraní použili. Nakoľko malo toto meranie prevažne informatívny charakter, tak sme tieto mierne odchýlky mohli zanedbať.

7.3. Meranie frekvenčnej charakteristiky realizovaného zapojenia modulátoru

Realizované zapojenie mobilného FSO modulátoru sme pre zistenie jeho správania pri zmene frekvencie a pre zistenie, pri akých hodnotách frekvencie je schopný plniť svoju úlohu vysielača, podrobili frekvenčnej charakteristike. Pri meraní sme použili zapojenie bez prúdovej kompenzácie a aj zapojenie s prúdovou kompenzáciou pre ich vzájomné porovnanie. Princípom merania bolo, že pri zvyšovaní frekvencie sme merali zmenu intenzity osvetlenia výkonovej LED diódy pomocou Lux metra. Tieto hodnoty sme následne zaznamenali a graficky zobrazili na obrázku 7.7.



Obrázok 7.7: Namerané frekvenčné charakteristiky

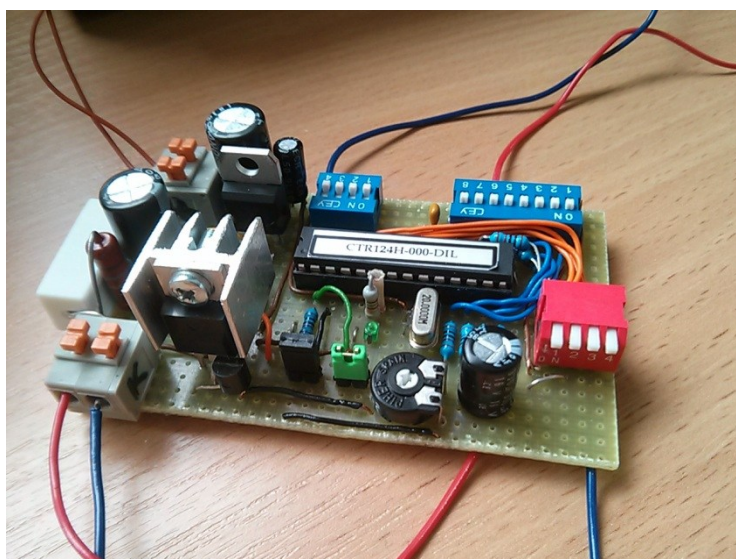
Z grafu na obrázku 7.7 je viditeľné, že zapojenie s prúdovou kompenzáciou dosahuje vyššie hodnoty intenzity osvetlenia pri celej frekvenčnej charakteristike. Pri nižších frekvenciách bol rozdiel oproti zapojeniu bez prúdovej kompenzácie až okolo 200 Lux. Pri zvyšovaní frekvencie sa tento rozdiel pomaly zmenšoval až na hodnotu 150 Lux. Modulátor pri frekvenciách $f=100\text{kHz}$ dosahoval ešte relatívne dobré výsledky a bolo ho možné použiť ako vysielač optického signálu pre mobilné FSO. Postupne pri zvyšovaní frekvencie na hodnotu $f=200\text{ kHz}$ bol už ale nevhodný, pretože nedokázal výkonovú diódu spínať v požadovanom čase. Z merania sme preto zistili, že modulátor je vhodný pre použitie na frekvenciách nižších ako $f=100\text{kHz}$. Jeho ideálne správanie sme zaznamenali pri $f=10\text{kHz}$.

7.4 Meranie pri použití Diferenciálneho Manchesteru

Ako vstupný signál do modulátora sme použili kóder diferenciálnej Manchester modulácie. V zapojení pre kóder Diferenciálneho Manchesteru bol použitý Control124. Control124 je 4bitový adresný a 12 bitový data kóder a dekáder kombinovaný v jednom integrovanom obvode. Používa súčtovú kontrolu $1\text{ kbp}\cdot\text{s}^{-1}$ Diferenciálneho Manchesteru s preambulou a checksum-om. Je špeciálne navrhnutý pre riadenie RF diaľkových ovládačov. [19]

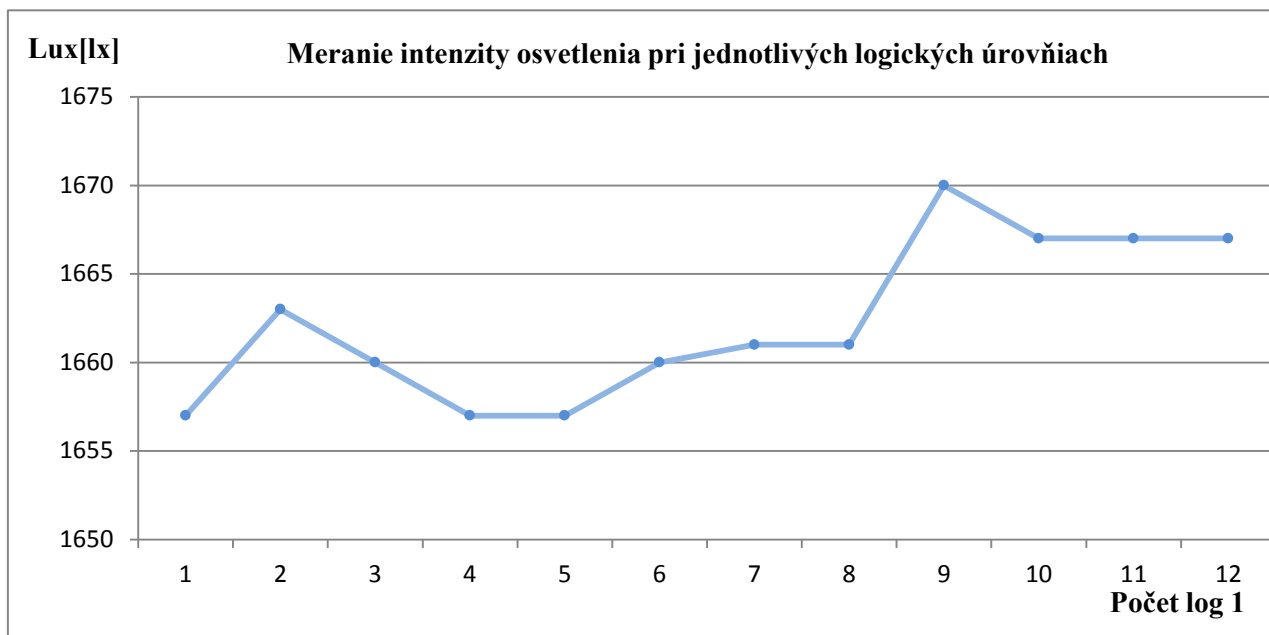
Preamble	Sync1	Sync2	Data A	Data B	Address	Checksum	Postamble
11001100	10111111	11110010	01101001	00001010	00010010	10000101	0000

Obrázok 7.8: Control124 data paket [19]



Obrázok 7.9: Použitý kóder Diferenciálneho Manchesteru

Pre možnosť merania intenzity osvetlenia pri jednotlivých logických úrovniach sme mali možnosť nastavovať na kóderi logickú úroveň dvanástich bitov, ktoré sú odoslané v jednom rámci. Jedná sa o byte Data A a Data B z odoslaného paketu. Pri byte Data B sme môžeme preniesť iba prvý až štvrtý bit. Pre informačné meranie sledovateľnosti komunikácie sme počas nastavovania počtu odoslaných logických 1 mohli merať intenzitu osvetlenia. Hodnota intenzity osvetlenia by sa relatívne nemala meniť, nezávisle od počtu odoslaných logických 1. Mala by mať konštantnú hodnotu. Pre meranie intenzity osvetlenia sme použili Lux meter, na ktorý bola nasmerovaná LED dióda v 90° uhle. Vzdialenosť Lux metra a vysiacej časti mobilnej FSO bola 0,5 m. Túto kratšiu vzdialenosť sme vybrali kvôli tomu, aby prípadné výchylky boli viditeľné čo najpresnejšie. Meranie sa odohrávalo v temnej miestnosti bez možnosti preniknutia nadbytočného svetla z okolia.



Obrázok 7.10: Intenzita osvetlenia pri jednotlivých log. úrovniach

Namerané hodnoty sme následne preniesli do grafického zobrazenia, ktoré sú na obrázku 7.10. Za ideálneho stavu by malo platiť, že hodnota intenzity osvetlenia by ostala na rovnakej úrovni. Tento fakt sa nám ale počas merania nepodarilo potvrdiť. Z nameraných hodnôt môžeme konštatovať, že počas merania sa hodnota intenzity osvetlenia pri zmene jednotlivých log. úrovni menila. Hodnota intenzity nestúpala alebo neklesala priamo úmerne podľa počtu prenesených log 1. Fluktuácia hodnoty intenzity osvetlenia sa pohybovala v rozmedzí 1657 až 1670 Lux. Pri odoslaní jedinej log 1 v byte určeného pre DataA a DataB bola táto hodnota najnižšia. Najvyššia hodnota bola zaznamenaná pri odoslaní deviatich log 1. Dôvodom týchto odmeraných fluktuácií je nedokonalé spínanie LED diódy. LED dióda počas vysielania logických 0 nie je schopná dosiahnuť svojho vyžarovacieho maxima. Ideálna dióda by mala mať okamžitú nábežnú hranu. Pri jej zopnutí by mala okamžite dosahovať maximálnej hodnoty vyžarovania. V reálnych podmienkach ale svetelná dióda postupne vyžaruje viac a viac energie, až pokiaľ nedôjde na svoje maximum. Doba, ktorú potrebuje dióda na svoje maximálne vyžarovanie energie od doby, kedy zopne diódu, nazývame dobežnou hranou diódy. Je preto vhodné, aby bola táto doba čo najkratšia, v ideálnych podmienkach nulová. Jednotlivé fluktuácie, ktoré nastali počas merania, boli zapríčinené aj v kombinácii s kódovaním Diferenciálneho Manchesteru. Pri hodnote log 0 sa signál vždy vráti k nulovému napätiu a dióda tak nestihne dosiahnuť na svoju maximálnu hodnotu vyžarovania. Pri hodnote log 1 zotrúva v tej istej hodnote úrovne a v prípade, že sa momentálne nenachádza na nulovom napätí, tak má dióda k dispozícii dlhší čas pri ktorom je zopnutá. Dosiahne tak svoju maximálnu hodnotu vyžarovania. Vtedy nastávajú zmeny intenzity osvetlenia, ktoré sme počas merania zaznamenali.

Dôležitým aspektom pre zhodnotenie prebiehajúcej komunikácie bolo jej samotné sledovanie. Pre funkčné odchytenie a sledovanie celej komunikácie sme sa rozhodli pre jej sledovanie na obrazovke osciloskopu. V zapojení sme použili ako zdroj generovaného signálu integrovaný obvod Control 124. Výstupný signál tohto zapojenia putoval do výkonovej LED diódy, ktorá tento výstupný signál opticky vyžarovala. Integrovaný obvod Control124

vysiela jednotlivé rámce za sebou v preddefinovanom tvare. Pre zachytenie tejto komunikácie sme umiestnili LED diódu smerom k fotodetektoru PDA100A-EC, ktorý sme napojili na osciloskop. Následne po dodaní vhodného elektrického napätia zo zdroja bolo všetko pripravené na meranie a zachytenie prenesených rámcov. Cieľom merania bolo zachytiť celý rámec, nájsť v priebehu komunikácie jeho začiatok, koniec a následne identifikovať jednotlivé oktety zachytené v tomto jednom rámci. Začiatok rámca začína preambulou s dĺžkou jedného oktetu, ktorá slúži na synchronizáciu. Za preambulou nasledujú dva synchronizačné oktety, dva datové oktety, jednooktetová adresa a kontrolný súčet. Na konci rámca sa nachádza postambula, ktorá značí ukončenie rámca. Skladá sa zo štyroch nulových bitov. [19]

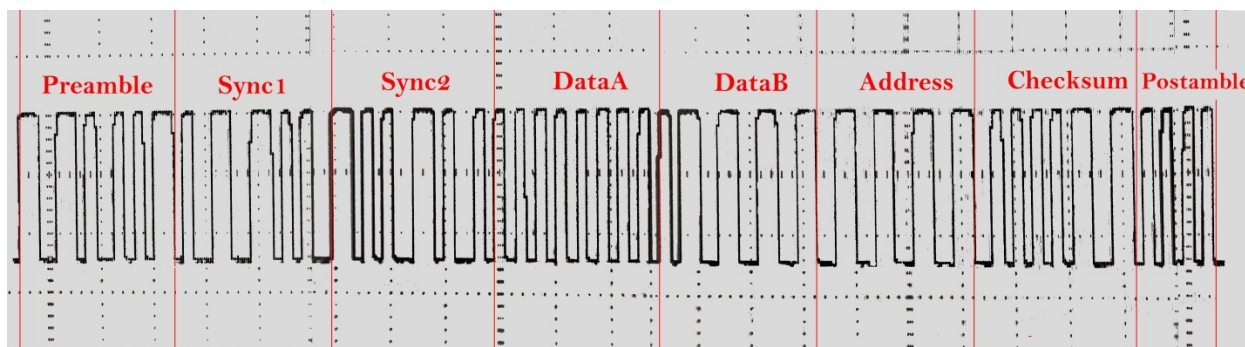


Obrázok 7.11 Prebieh komunikácie

Na obrázku 7.11 je zachytený priebeh merania komunikácie medzi vysielacou časťou FSO a fotodetektorom, ktorý bol pripojený na osciloskop.

Tabuľka 7.1: Zloženie preneseného rámca

Preamble	Sync1	Sync2	Data A	Data B	Address	Checksum	Postamble
11101001	01111001	10011010	00000000	01111111	11111111	10000111	0000



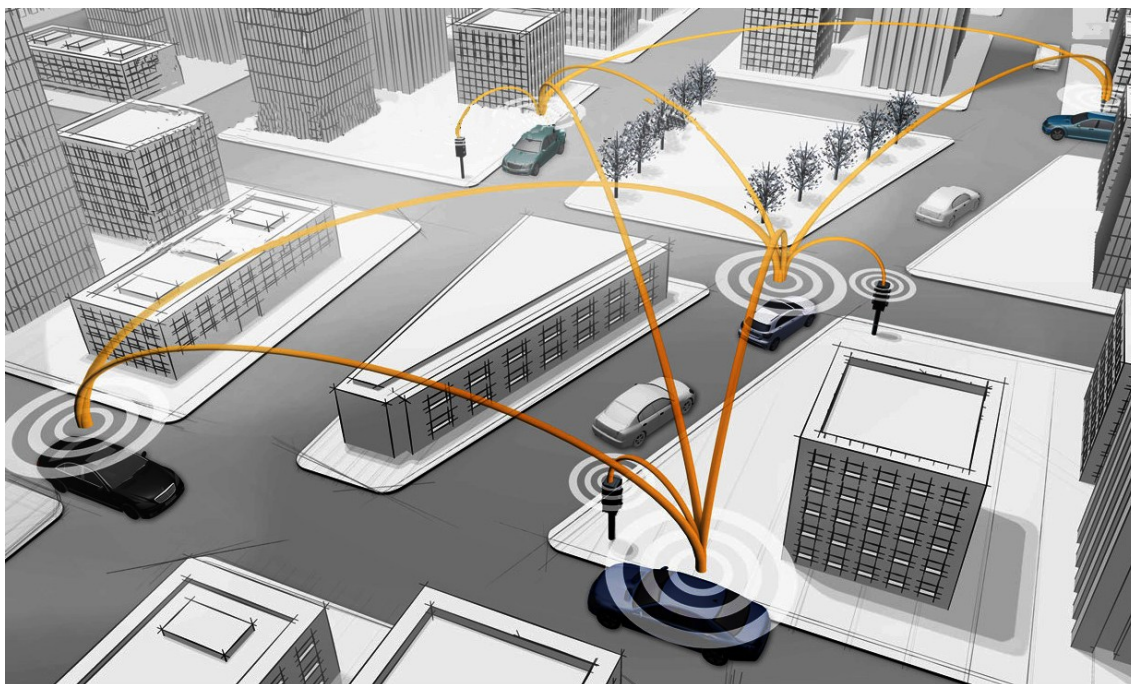
Obrázok 7.12: Prenesený rámec

Na obrázku 7.12 je zachytený prenesený rámec, ktorý sa nám podarilo zaznamenať pomocou osciloskopu. Počas merania sme mohli pomocou jednotlivých pinov nastavovať logické úrovne na oktetoch DataA a DataB. Úspešne sa nám podarilo nájsť začiatok rámca. Ten sme identifikovali pomocou preamble, ktorou rámec začína. Pomôckou pri identifikovaní začiatku rámca môže byť aj postambula z predošlého rámca. Po zistení začiatku rámca bolo už jednoduché určiť aj ostatné oktety rámca a definovať ich logické úrovne. Jednotlivé určené logické úrovne sú uvedené v tabuľke 7.1.

8. Praktické overenie funkcie

8.1 Komunikácia V2I a V2V

Pokrok v dnešnej dobe technológie je nesmierne vysoký. Neustály objav nových technológií nám ponúka široké možnosti ich aplikácie v jednotlivých odvetviach. Jedným z týchto odvetví je aj automobilový priemysel a cestná infraštruktúra ako taká. Čoraz väčší dôraz v cestných komunikáciách sa kladie na bezpečnosť, plynulosť premávky a jednotlivé ekologické pokroky. Ministerstvo dopravy v USA má momentálne v príprave dva hlavné programy, ktoré je možné aplikovať do inteligentného dopravného systému. Sú nimi programy Vehicle-to-infrastructure (V2I) a program Vehicle-to-Vehicle (V2V). Oba programy sú vytvorené z technológií v oblasti aplikácie, kde je potrebné využiť bezdrôtovú aplikáciu medzi cestnou infraštruktúrou a vozidlom. Presnejšie, tieto programy zisťujú vzdialenosť, charakteristiku a cenu zrážky medzi vozidlom a jednotlivými objektmi v jeho okolí. Jednou z úloh je teda predísť zrážkam a zvýšiť bezpečnosť na verejných komunikáciách. Jeho využitie sa aplikuje aj v ovládaní jazdy vozidiel, určenia vozidiel s prednosťou jazdy, logickej plynulosti premávky a ďalších bezpečnostných oblastiach. [20][21][22]

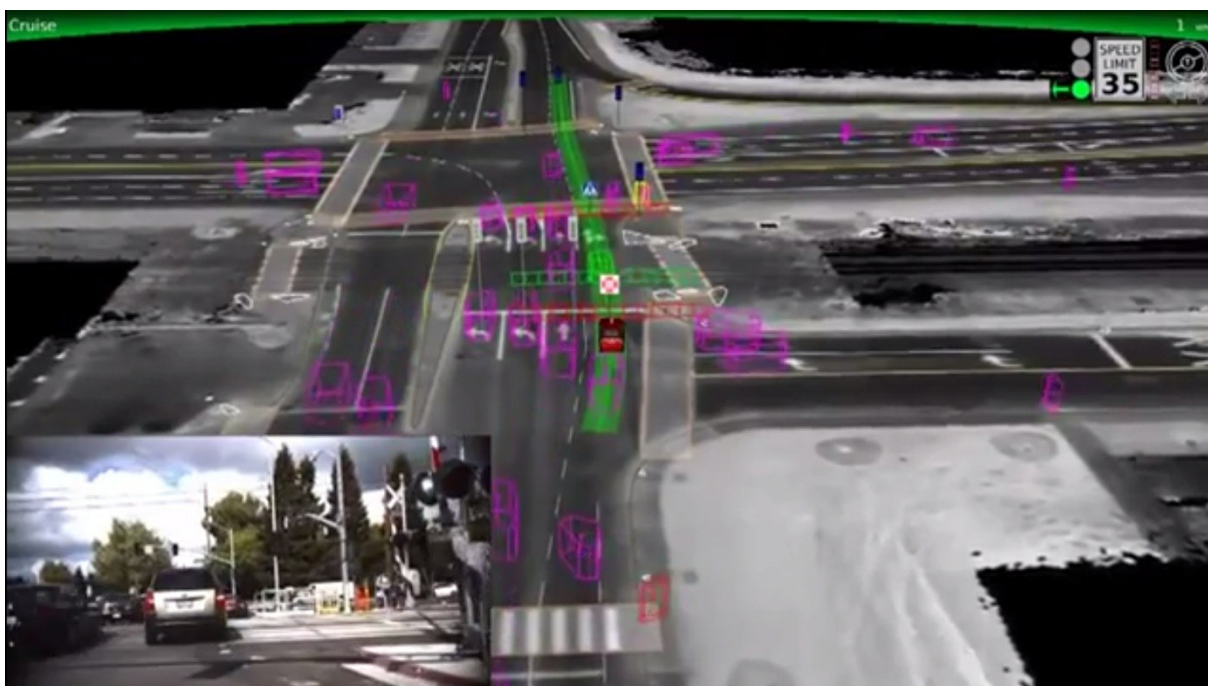


Obrázok 8.1: Technológia Vehicle to Infrastructure [23]

Jedným z prebiehajúcich projektov bezpečnej cestnej infraštruktúry je projekt od spoločnosti Google s názvom Self-Driving Car. Vozidlá pomocou tejto technológie sú počas premávky na cestných komunikáciách schopné bezpečnej neasistovanej samostatnej jazdy. Ich vývoj je však nesmierne náročný. Samotné vozidlo musí poznať terén a okolie, v ktorom sa pohybuje. Musí poznať dopravné značenie, ktoré sa nachádza na cestných komunikáciách. Je preto potrebné, aby bola určitá časť trasy po ktorej vozidlo cestuje vhodne vopred zaznamenaná spôsobom, ktorým by mohli z databázy neskôr ostatné vozidlá čerpať potrebné informácie. Vozidlo musí byť schopné predvídať nebezpečné situácie na vozovke a prispôbiť im svoju jazdu. Všetky

potrebné požiadavky, ktoré je potrebné splniť pre túto správnu funkciu, sú pre inžinierov jednou veľkou výzvou. Na úspešnom konci ich, ale čaká obrovský úspech, ktorý by dosiahli.

Ušetrené peniaze a náklady, ktoré sú spojené so všetkými automobilovými haváriami, by boli celosvetovo obrovské. Takisto chceme zdôrazniť najdôležitejší fakt, a síce, že táto technológia dokáže zvýšiť bezpečnosť na cestných komunikáciách, teda zachrániť životy a znížiť nehodovosť spôsobenú ľudským faktorom. Zamedzenie ľudskej chybovosti v cestných komunikáciách je preto potrebné. Zachránenie ľudských životov sa nedá vyjadriť náhradnou peňažnou sumou, ktoré ponúkajú ako cenu útechy zdravotné poisťovne. Mŕtve obeť nehôd nevráti medzi živé ich ponúknutá finančná čiastka. Zníženiu negatívnych dôsledkov na ľudské životy a zdravie tak môže predísť inteligentný dopravný systém na základe bezdrôtovej optickej technológie. Preto modifikácia tohto systému s technológiu V2I a V2V môže byť veľmi prospešnou pre širokú verejnosť. [24]



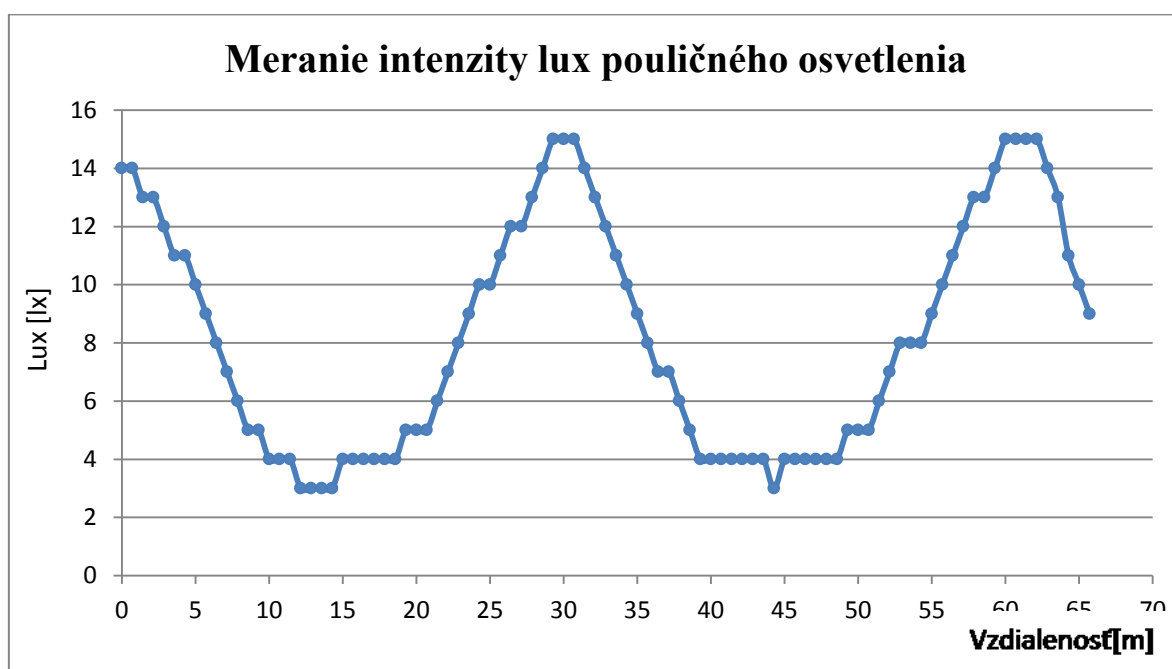
Obrázok 8.2: Virtuálne prostredie samostatne riadiaceho auta [25]

Na obrázku 8.2 je zobrazené virtuálne prostredie vozidla Google Self-driving car. Môžeme na ňom spozorovať cudzie vozidlá, ktoré sú vykreslené fialovou farbou. V spodnom ľavom rohu máme možnosť živého náhľadu z čelnej strany vozidla.

8.2 Parametre pouličného osvetlenia

Potenciál využitia mobilnej FSO je pomerne veľmi široký. Ich používanie vo vnútorných priestoroch je vhodné predovšetkým v kancelárskych priestoroch, obchodných strediskách, bytoch alebo v priestoroch, v ktorých nie je povolené používať RF zariadenia. Sú nimi napr. lietadlá, nemocnice alebo špecifické vojenské základne. Využitie má však vysoký potenciál aj vo vonkajších priestoroch, nakoľko FSO technológiu je možné použiť pre bezdrôtovú komunikáciu v mestách na kratšie alebo aj dlhšie vzdialenosti. Jedným zo smerov, ktorým veríme, že sa FSO posunie v budúcnosti ďalej, bude jej využitie v inteligentnom

dopravnom systéme. Ten by mal za úlohu udržiavať bezpečnosť a plynulosť premávky na cestách. Vysielačom tohto signálu by bolo samotné verejné osvetlenie, ktoré je umiestnené na cestných komunikáciách. Ich poloha a vzdialenosť od cesty je často krát rôzna a mení sa v závislosti od rôznych podmienok. Vhodnosť a samotné potrebné podmienky pre bezdrôtovú optickú komunikáciu boli ďalšou časťou nášho výskumu. Ako prvým praktickým krokom bolo odmeranie intenzity verejného osvetlenia na ceste. Princíp merania spočíval v tom, že sme sa postavili pod verejné osvetlenie určené pre osvetlenie cestných komunikácií. Na celej trase určenej pre meranie sme postupne po vzdialenosti jeden meter zaznamenávali pomocou lux metra hodnotu intenzity osvetlenia. Meranie prebehlo v neskorých nočných hodinách tak, aby bolo čo najmenej narušené z externých zdrojov vyžarujúcich nežiaduce svetlo. [26]



Obrázok 8.3: Graf intezity osvetlenia

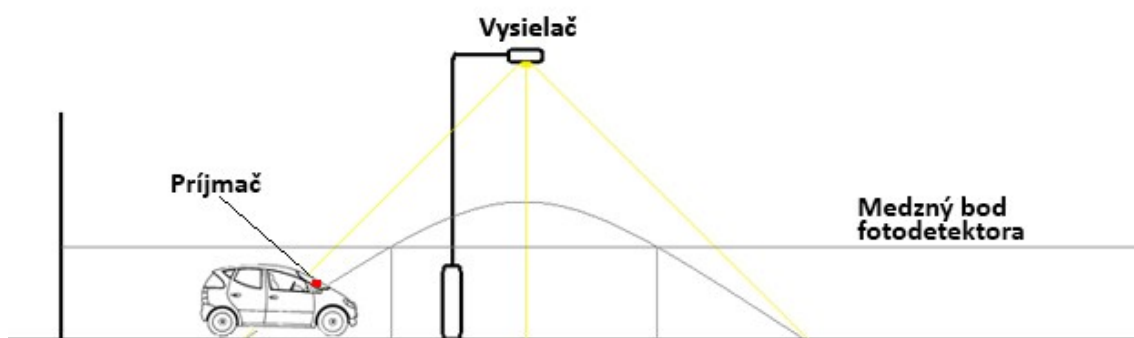
Jednotlivé namerané hodnoty sme zapísali a graficky vyhodnotili na obrázku 8.3. Pre bezdrôtovú optickú komunikáciu je potrebné dosiahnuť minimálne hodnoty intenzity osvetlenia aspoň na úrovni 10 luxov. Túto hodnotu určuje medzný bod fotodetektoru a pod touto úrovňou je komunikácia pre použitý fotodetektor obtiažna. Táto hodnota sa preto môže meniť v závislosti od použitého fotodetektora.

Pri meraní intenzity verejného osvetlenia bola ale použitá pôvodná žiarovka a nie naša testovacia 5W výkonová LED dióda. Lampa verejného osvetlenia ma rozdielne parametre a preto sme nemuseli v meraní zohľadňovať vzdialenosť od prijímača. Podstatným faktorom bolo zistiť, či hodnota intenzity osvetlenia klesne pod hraničnú hodnotu 10 luxov. Z nameraných hodnôt môžeme konštatovať, že potrebná minimálna intenzita osvetlenia nad cestou bola v tomto prípade zabezpečená a bezdrôtová komunikácia by mohla prebiehať spoľahlivo. Jednotlivé lampy boli od seba vzdialené 30m. Za ideálnych podmienok by sa optické lúče jednotlivých osvetlení navzájom prekryvali na čo najmenšej vzdialenosti, ale stále si zanechali aspoň potrebnú minimálnu hodnotu intenzity osvetlenia. V prípade, že intenzita osvetlenia klesne pod hodnotu 10 luxov, by nastala situácia, počas ktorej by prijímač na mobilnom vozidle nebol schopný správne detekovať vysielaný signál.

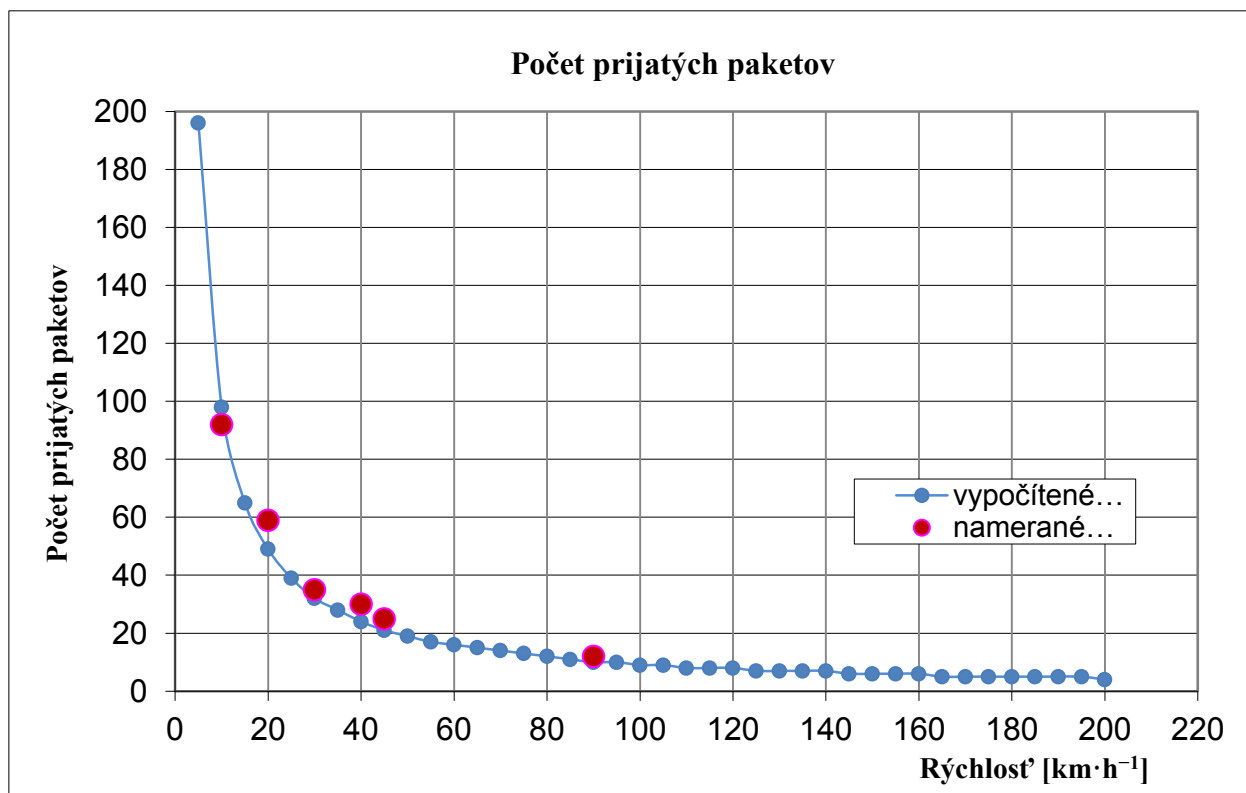
Toto meranie malo informatívny charakter. Výsledky nám slúžili pre zistenie schopnosti bezdrôtovej optickej komunikácie medzi verejným osvetlením a mobilným vozidlom. Podľa výsledkov sme zhodnotili podmienky pre ďalšie meranie, ktoré malo nasimulovať priebeh bezdrôtovej optickej komunikácie na cestných komunikáciách. Bolo potrebné približne prispôbiť aj podmienky merania a intenzitu osvetlenia merať vo výške, v ktorej sa očakáva, že bude prijímač na mobilnom automobile umiestnený. Ako miesto umiestnenia prijímača sme zvolili čelné sklo mobilného vozidla, ktoré sa nachádza vo výške 1,2 m.

8.3 Meranie prijatých paketov na automobilovom vozidle

Vyvrcholením celého výskumu bolo samotné otestovanie, či je skonštruované zapojenie použiteľné pre mobilnú bezdrôtovú optickú komunikáciu. Našou úlohou bolo experimentálne nasimulovať podmienky, za akých by bola FSO technológia použitá v automobilovej doprave na cestných komunikáciách. Úlohou merania bolo preto v prvom rade odmerať dráhu pokrytia signálu, ktorú vyžaruje LED dióda. Na tejto dráhe je vozidlo s prijímačom optického signálu schopné prijať a detekovať vysielaný signál. Našou úlohou bolo zaznamenať počet paketov, ktoré FSO prijímač vo vozidle dokázal prijať počas vzdialenosti, na ktorej bola pokrytá plocha vysielaným signálom. Počet prijatých paketov závisel od rýchlosti, akou sa vozidlo s FSO prijímačom pohybovalo. Pre meranie bolo potrebné umiestniť mobilný FSO vysielateľ na stojan, ktorý predstavoval náhradu verejného osvetlenia. Napájanie vysielateľa sme zabezpečili pomocou externého zdroja elektrického napätia. Optický prijímač bol umiestnený na čelnom skle motorového vozidla a bol napájaný zdrojom elektrického napätia vo vozidle.



Obrázok 8.4: Simulácia komunikácie V2I



Obrázok 8.5: Graf vypočítaných a nameraných hodnôt

Na obrázku 8.5 je graficky vyjadrená závislosť počtu prijatých paketov od rýchlosti automobilového vozidla na prebehnutom meraní. Modrou farbou na grafe sú znázornené vypočítané hodnoty, kde sme predpokladali, že hodnoty budú podobné ako namerané hodnoty. Červenou farbou na grafe sú znázornené namerané hodnoty. Meranie sme previedli pri rýchlostiach automobilového vozidla 10,20,30,40,45 a 90 km·h⁻¹. Pri porovnaní nameraných a vypočítaných hodnôt môžeme spozorovať malé odchýlky. S týmito odchýlkami sme vopred počítali z viacerých dôvodov. Rýchlosť automobilového vozidla nebola vždy maximálne presná, nakoľko toto vozidlo nemalo zabudovaný tempomat pre udržanie konštantnej rýchlosti a rýchlosť vozidla mohla podľa tachometra kolísť na hodnotách ± 2 km·h⁻¹. Druhým dôvodom bol fakt, že prijímač optického signálu detekoval iba prijatý celý rámec. Tento poznatok bol dôležitý predovšetkým na začiatku a na konci komunikácie, kedy je vysoko pravdepodobné, že prijímač nezachytil úplne celý rámec, ale iba časť z neho. Z grafického priebehu merania môžeme tvrdiť, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou sa priamo úmerne znižuje počet prijatých paketov. Je to spôsobené tým, že automobilové vozidlo prejde rovnaký úsek, ktorý je pokrytý mobilným FSO vysielačom rýchlejšie a má menej času k dispozícii na to, aby prijal rovnaké množstvo paketov. Dĺžka trvania odoslania jedného rámcu je 11 ms. Z toho dôvodu nie je možné, aby automobilové vozidlo, v ktorom je umiestnený FSO prijímač pri vyššej rýchlosti a na rovnakej dĺžke pokrytej plochy prijal rovnaké množstvo paketov. Cieľom tohto merania bolo zistiť či je realizované zapojenie použiteľné pre využitie v automobilovej doprave pre jeho začlenenie do inteligentného dopravného systému. Kľúčovým kritériom, podľa ktorého bolo možné určiť vhodnosť zapojenia pre jeho integráciu do inteligentného dopravného systému, bolo zistiť pri akej rýchlosti je schopné vozidlo s prijímačom zachytiť minimálne 5 paketov. Pri tomto množstve je možná bezproblémová bezdrôtová optická

komunikácia. Pri rýchlostiach do $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bol počet prijatých paketov 60. Počet prijatých paketov so zvyšujúcou sa rýchlosťou klesal. Pri rýchlosti $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ sme na automobilovom vozidle pomocou prijímača prijali 25 paketov, čo je stále vysoko nad rámec požadovanej minimálnej hodnoty 5 paketov pre komunikáciu. Pri rýchlosti $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ prijímač vo vozidle dosahoval hodnotu 12 prijatých paketov. Jednotlivé namerané hodnoty boli veľmi blízke k vypočítaným hodnotám. Z toho dôvodu môžeme zhodnotiť meranie aj pri vyšších rýchlostiach, ktoré sme už ďalej nemerali.

Z vypočítaných hodnôt teda konštatujeme, že skonštruované vysielačie zapojenie je vhodné pre bezproblémovú bezdrôtovú optickú komunikáciu v inteligentnom dopravnom systéme V2I. Maximálna rýchlosť, počas ktorej bolo schopné vozidlo prijať minimálny počet rámcov dosahovala až $196 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Takéto vysoké rýchlosti sú ďaleko nad limitom maximálnej dovolenej rýchlosti pre automobilové vozidlá na území Českej republiky. Táto rýchlosť by bola dokonca dostatočná aj pre bezdrôtovú optickú komunikáciu s vlakmi Pendolino. [21][22]



Obrázok 8.6: Meranie komunikácie V2I na automobilovom vozidle

Záver

Cieľom našej bakalárskej práce bol samotný návrh a realizácia mobilnej vysielacej časti bezdrôtového optického spoja (FSO), experimentálne overenie funkčnosti realizovaného zapojenia a zhodnotiť jeho využitie v systémoch V2I.

V prvých kapitolách je uvedený teoretický popis bezdrôtových optických systémov.

Práca porovnáva zapojenia vhodné pre modulátor mobilnej FSO siete. Následne popisuje modifikáciu zapojenia pre modulátor o pridanie filtrácie napájacieho napätia a pridanie kompenzačného kondenzátora. Zobrazuje realizáciu tohto zapojenia a jeho porovnanie so zapojením bez tejto modifikácie.

Samotná komunikácia FSO by nemala byť pozorovateľná. Počas merania intenzity osvetlenia pri jednotlivých logických úrovniach, hodnota intenzity osvetlenia kolísala od hodnoty 1655 Lux až po hodnotu 1670 Lux. Intenzita osvetlenia teda nebola konštantná a menila sa počas merania.

V časti experimentálneho merania intenzity osvetlenia realizovaného zapojenia sme zistili, že zapojenie s kompenzačným kondenzátorom malo počas merania vyššiu hodnotu intenzity osvetlenia. Pri nízkych frekvenciách začínajúcich od $f=1\text{kHz}$ až po $f=10\text{kHz}$ bol tento rozdiel až 300 luxov. Postupom merania počas zvyšovania frekvencie sa tento rozdiel pomaly zmenšoval až na hodnotu 200 luxov. Z frekvenčnej charakteristiky sme zistili, že pre bezproblémovú komunikáciu modulátor mohol pracovať pri frekvenciách maximálne do $f=100\text{kHz}$. Ideálne správanie modulátora bolo zaznamenané pri frekvenciách do 10 kHz.

Počas merania vysielanej komunikácie sa nám úspešne podarilo zachytiť na osciloskope odoslaný rámec zakódovaný pomocou Diferenciálneho Manchester kódu. Označili sme jeho jednotlivé oktety a určili ich logické úrovne.

Vďaka meraniu intenzity pouličného osvetlenia sme zistili pokrytie optickým signálom pod týmto osvetlením. Pokrytie osvetlenia predstavovalo okruh s priemerom 12m.

Pomocou merania prijatých paketov na automobilovom vozidle sme sa snažili overiť, či je zapojenie vhodné pre komunikáciu Vehicle to Infrastructure. Meraním sme zistili, že pomocou realizovaného vysielateľa je jeho aplikácia možná aj pri veľmi vysokých rýchlostiach. Vozidlo bolo schopné bezproblémovej komunikácie v rýchlosti až do $196\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Táto rýchlosť je vysoko nad požadovanými hodnotami.

Realizovaný vysielateľ mobilnej bezdrôtovej optickej siete, je podľa meraní schopný komunikácie v inteligentnom komunikačnom systéme V2I.

Použitá literatura

- [1] WILLEBRAND, Heinz a Baksheesh S GHUMAN. *Free-space optics: enabling optical connectivity in today's networks* [online]. Indianapolis: Sams, 2002, ix, 259 s. [cit. 2014-05-05]. ISBN 06-723-2248-X.
- [2] KHUMSAT, Phanumas; WATTANAPISI, Noppadol. *Low-Cost Laser-Based Wireless Optical Transceiver for 10-Mbps Ethernet Link*. Thailand : Faculty of Engineering, Prince of Songkla Univesity, 2006. s. 4.
- [3] AGRAWAL, G. *Lightwave technology: components and devices*. Hoboken, NJ: John Wiley, 004. ISBN 0471215732-.
- [4] PAHLAVAN, Kaveh, Thomas H PROBED a Mitchell E CHASE. *Trends in Local Wireless Networks*. [online]. 1995 [cit. 2013-04-12]. DOI: 0163-6804/95/\$04.00 199. Dostupné z: <http://www.cwins.wpi.edu/publications/docs/Trends%20in%20Local%20Wireless%20Networks.pdf>
- [5] *Design of an OmnidirectionalMultibeamTransmitter forHigh-Speed Indoor Wireless Communications* [online]. 2010 [cit 2013-12-10]. Dostupné z <http://downloads.hindawi.com/journals/wcn/2010/728468.pdf>
- [6] *Smart Led lighting*. [online]. [cit. 2013-24-02]. Dostupné z: <http://www.eecs.tufts.edu/~amirva01/uploads/7/0/9/7/7097701/8853700.jpg?325>
- [7] NEO, Soo Sim Daniel. *FREE SPACE OPTICS COMMUNICATION FOR MOBILE MILITARY PLATFORMS*. 2003. Dostupné z: http://calhoun.nps.edu/public/bitstream/handle/10945/6160/03Dec_Neo.pdf?sequence=1
- [8] *A Review on Indoor Optical Wireless Systems*. In: SINGH, Chaturi, John JOSEPH a K.K. TRIPATHI.[online]. [cit. 2014-20-03]. Dostupné z: <http://home.iitk.ac.in/~ynsingh/papers/OwsRev-paper1.pdf>
- [9] *PN Junction*. [online]. Dostupné z: <http://i1.ytimg.com/vi/2AX0qvnjSnM/pnjunction.jpg>
- [10] *LED diode*. [online]. Dostupné z: <http://www.gogreenglobalcorp.com/img/ledcrossection.jpg>
- [11] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika: components and devices*. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008. ISBN 978-80-85970-64-7.
- [12] *Laser diode*. [online]. Dostupné z: <https://assets.newport.com/web600w-EN/images/1225583.gif>

-
- [13] *Laser diode*. [online]. Dostupné z:
<http://media.digikey.com/photos/US%20Lasers/D6505I.jpg>
- [14] DAVID, Tomas, Jan LATAL, Frantisek HANACEK, Petr KOUDELKA, Jan VITASEK, Petr SISKÁ, Jan SKAPA a Vladimír VASINEK. *CROSS-SECTIONAL MEASURING OF OPTICAL BEAM*. [online]. 2011 [cit. 2013-08-01]. Dostupné z:
<http://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/89792/AEEE-2011-9-4-179-david.pdf?sequence=1>
- [15] DAVID J. T. HEATLEY, David R. Wisely, Ian Neild, and Peter Cochrane. *Optical Wireless: The Story So Far* [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z:
[http://dessto.lbcfree.net/docs/Atmospheric%20absorption/1998%20Heatley%20et%20al%20\(IEEE%20Comm%20Mag\)%20Optical%20wireless%20-%20the%20story%20so%20far.pdf](http://dessto.lbcfree.net/docs/Atmospheric%20absorption/1998%20Heatley%20et%20al%20(IEEE%20Comm%20Mag)%20Optical%20wireless%20-%20the%20story%20so%20far.pdf)
- [16] HEJDUK, Stanislav, Karel WITAS, Jan LATAL, Jan VITASEK, Jiri BOCHEZA a Vladimír VASINEK. *Simple and Universal Current Modulator Circuit for Indoor Mobile Free-Space- Optical Communications Testing*. [online]. 2014 [cit. 2014-25-04]. Dostupné z:
<http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/viewFile/845/945>
- [17] B. CARRUTHERS, Jeffrey. *Wireless Infrared Communications*. [online]. 2002 [cit. 2014-2-02]. Dostupné z: <http://iss.bu.edu/jbc/Publications/jbc-bc1.pdf>
- [18] NINGBO SUNPU OPTO. *Datasheet for LED power white 6000k 5W 500lm 120* [online]. [cit. 2013-30-12]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/518/081/led-power-white-6000k-5w-500lm-120-datasheet-1.pdf>
- [19] *Datasheet for Control124 4 bit Address 4 bit Address - Address - 12 bit Data encoder/decoder –12 bit Data encoder/decoder*. Radiometrix [online]. roč. 2007 [cit. 2014-14-01]. Dostupné z:
<http://www.radiometrix.com/files/additional/ctr124.pdf>
- [20] HOLFELDER, Dr. Wieland. *Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communication Recent Developments, Opportunities and Challenges*. [online]. 2004 [cit. 2014-25-04]. Dostupné z:
<http://aswsd.ucsd.edu/2004/pdfs/V2VandV2ICommunication-Slides-WHolfelder.pdf>
- [21] KOUDELKA, Petr, Jan LÁTAL, Vladimír VAŠINEK, František DOSTÁL a Karel SOKANSKÝ. *Research of power LEDs for mobile communication*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z:
-

<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/84510/przeglad-elektrotech-2011-87-4-1-koudelka.pdf?sequence=2>

- [22] R. EVANS, Monique. *Crash Data Analyses for Vehicle-to- Infrastructure Communications for Safety Applications*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/connectedvehicles/11040/11040.pdf>
- [23] MERCEDES V2I *Mercedes V2I Communication*. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www5.mercedes-benz.com/en/innovation/car-to-x-communication-dialogue-on-the-road-increases-safety-comfort-efficiency/>
- [24] *Google: Self-driving cars are mastering city streets*. [online]. 2014. Dostupné z: <http://timesofindia.indiatimes.com/tech/more-gadgets/Google-Self-driving-cars-are-mastering-city-streets/articleshow/34347209.cms?>
- [25] *Google Self-Driving Car on City Streets*. [online]. 2014 [cit. 2014-28-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=csvt6JBAwBk>
- [26] HASON, Zdeněk. *VEREJNÉ OSVETLENIE modernizácia ako cesta k úsporám* [online]. 2007 [cit. 2014-03-01]. ISBN 978-80-239-9420-9. Dostupné z: http://www.vo-revital.cz/docs/kniha-vydani-pro-SR-verejne_osvetlenie-VII-2007.pdf
- [27] *Pendolino*. [online]. 2014 [cit. 2014-28-05]. Dostupné z: <http://tema.novinky.cz/pendolino>

Zoznam príloh

Počet strán: 4

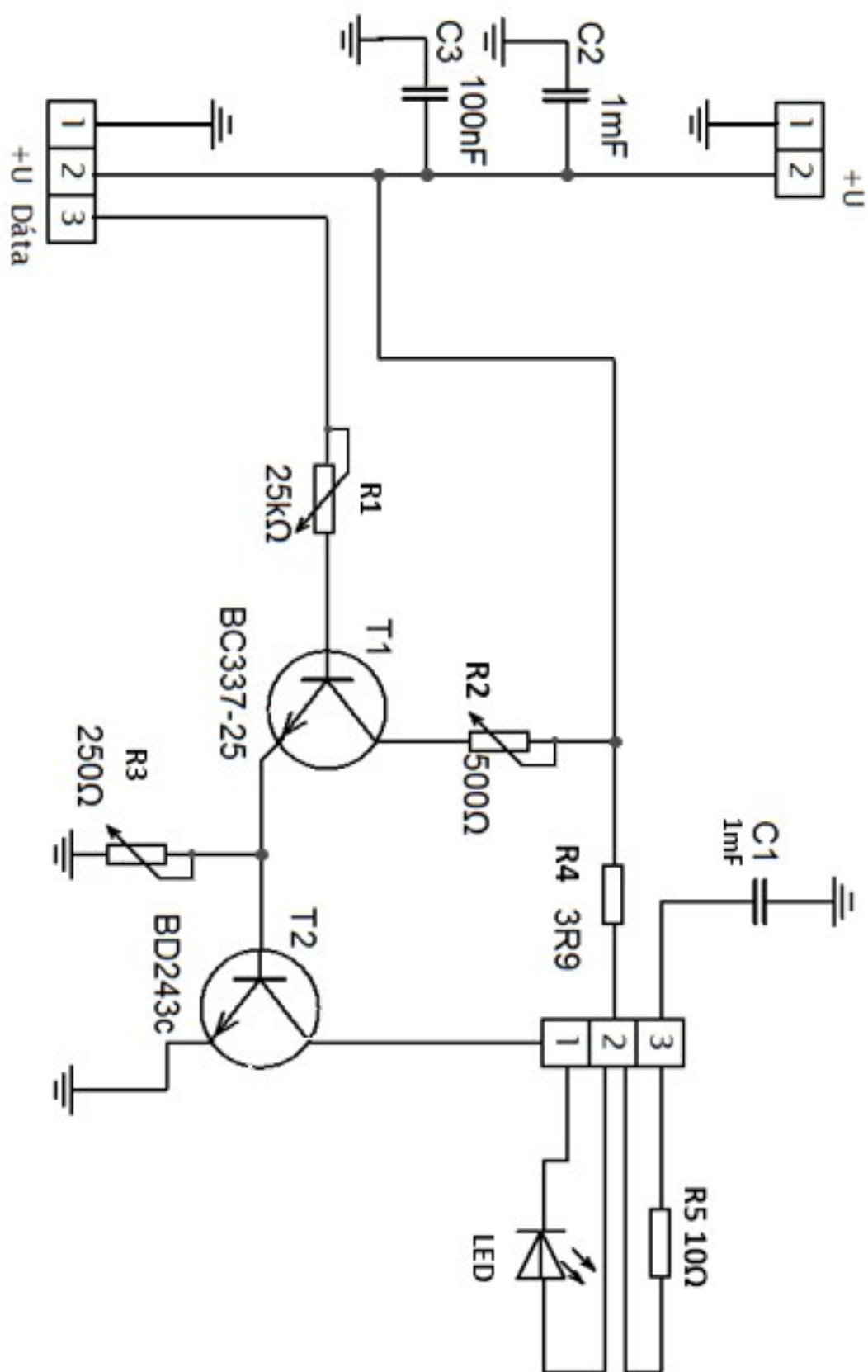
Príloha A: Meranie výberu vhodných dvojíc tranzistorov v zapojení

Príloha B: Návrh schémy a plošného spoja realizovaného modulátora

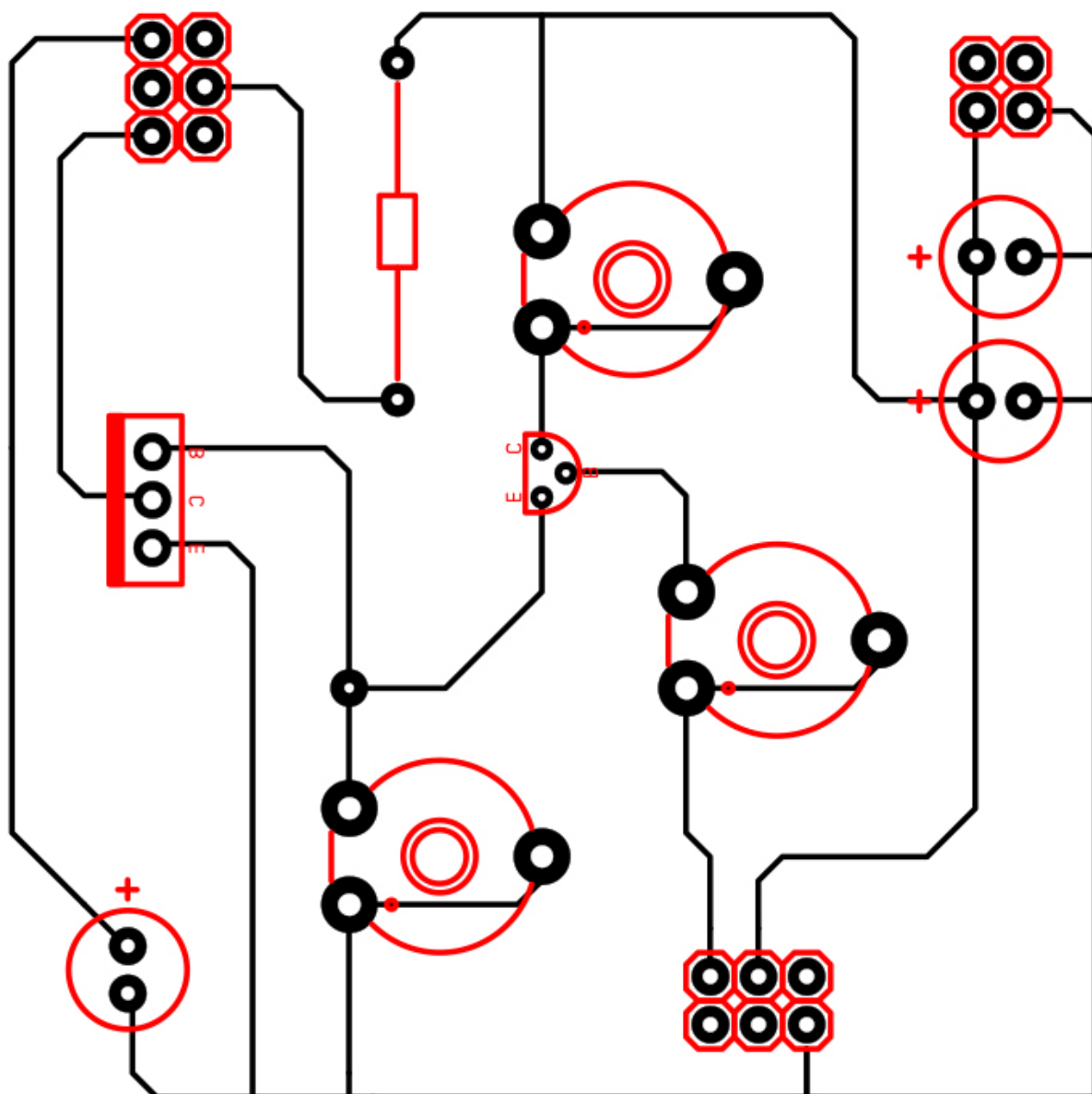
Príloha C: Datasheety

Príloha D: Jednotlivé merania

Prílohy v bakalárskej práci sú súčasťou priloženého CD, príloha B a D je čiastočne obsiahnutá v tlačenej verzii.



Obrázok 1: Navrhnutá schéma modulátora pre vysieláciu časť FSO



Obrázok 2: Návrh plošného spoja vysielacej časti FSO

Tabuľka 1: Vyžarovacia charakteristika LED

Uhol [°]	Svetelnost[lx]	Uhol [°]	Svetelnost[lx]
90	10	5	525
85	27	10	521
80	55	15	511
75	84	20	504
70	105	25	483
65	158	30	462
60	213	35	437
55	266	40	413
50	300	45	375
45	352	50	341
40	390	55	298
35	435	60	255
30	464	65	211
25	485	70	162
20	502	75	113
15	514	80	64
10	521	85	32
5	525	90	14
0	527	0	527

Tabuľka 2: Frekvenčná charakteristika realizovaného zapojenia modulátora

	Bez prúdovej kompenzácie	S prúdovou komenzáciou
f[kHz]	Intenzita osvetlenia[lux]	Intenzita osvetlenia[lx]
0,1	906	1159
0,2	901	1173
0,3	900	1180
0,5	900	1182
1	915	1212
2	927	1208
3	929	1203
5	934	1201
10	965	1232
20	1016	1248
30	1056	1272
50	1114	1312
100	1205	1351
200	1228	1431
300	1292	1430
500	1367	1456
600	1533	1596

Tabuľka 3: Meranie intenzity osvetlenia pri jednotlivých logických úrovniach

Počet prenesených log 1	Intenzita osvetlenia[lx]
1	1657
2	1663
3	1660
4	1657
5	1657
6	1660
7	1661
8	1661
9	1670
10	1667
11	1667
12	1667